

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа ядерных технологий (ИЯТШ)

Направление подготовки 14.04.02 Ядерные физика и технологии / Технологии радиационной безопасности

Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерно-топливного цикла (ОЯТЦ)

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
ИЗУЧЕНИЕ ГЕНЕРАЦИИ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СУБТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ РЕЛЯТИВИСТСКИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ ПРИ ПРОЛЁТЕ ВБЛИЗИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ МИШЕНЕЙ

УДК 537.531:621.384.6

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM84	Попов Константин Евгеньевич		20.05.2020

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
В.н.с. ИШФВП	Наumenко Г. А.	д.ф.-м.н		20.05.2020

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Кашук И. В.	к. т. н.		03.05.2020

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЯТЦ	Гоголева Т. С.	к.ф.-м.н.		15.05.2020

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Веригин Д. А.	к.ф.-м.н.		

Томск – 2020 г.

Планируемые результаты освоения программы 14.04.02

Код	Результат обучения*	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон
Общие по направлению подготовки (специальности)		
P1	Применять глубокие, математические, естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания для теоретических и экспериментальных исследований в области использования ядерной энергии, систем учета, контроля и физической защиты источников ионизирующего излучения, технологий радиационной безопасности и защиты от ионизирующего излучения, в профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОПК-1,2, ПК-3, УК-1), Критерий 5 АИОР (п.1.1), требования профессиональных стандартов 24.020, 24.079, 24.030
P2	Ставить и решать инновационные инженерно-физические задачи, реализовывать проекты в области использования ядерной энергии, систем учета, контроля и физической защиты источников ионизирующего излучения, технологий радиационной безопасности и защиты от ионизирующего излучения.	Требования ФГОС (ПК-9,10,13, 14, 15, ОПК-1,УК-4), Критерий 5 АИОР (пп.1.2), требования профессиональных стандартов 24.020, 24.079, 24.030
P3	Создавать теоретические, физические и математические модели, описывающие распространение и взаимодействие ионизирующих излучений с веществом и живой материей, процессы в реакторах и ускорителях, процессы и механизмы переноса радиоактивности в окружающей среде.	Требования ФГОС (ПК-1,13, 22, УК-1, ОПК-1), Критерий 5 АИОР (п.1.3) , требования профессиональных стандартов 24.020, 24.079, 24.030
P4	Разрабатывать новые алгоритмы и методы: расчета современных физических установок и устройств; измерения характеристик полей ионизирующих излучений; оценки количественных характеристик источников ионизирующего излучения; измерения радиоактивности объектов окружающей среды; исследований в радиоэкологии.	Требования ФГОС (ПК-2, 4, 6, 8, УК-1, ОПК-1), Критерий 5 АИОР (п.1.4) , требования профессиональных стандартов 24.020, 24.079, 24.030
P5	Оценивать перспективы развития ядерной отрасли, анализировать радиационные риски и сценарии потенциально возможных аварий, разрабатывать меры по снижению рисков и обеспечению ядерной и радиационной безопасности руководствуясь законами и нормативными документами, составлять экспертное заключение.	Требования ФГОС (ПК-5, 7, 11, 12, УК-1, ОПК-1), Критерий 5 АИОР (п.1.4), требования профессиональных стандартов 24.020, 24.079, 24.030
P6	Проектировать и организовывать инновационный бизнес, разрабатывать и внедрять новые виды продукции и технологий, формировать эффективную стратегию и активную политику риск-менеджмента на предприятии, применять методы оценки качества и результативности труда персонала, применять знание основных положений патентного законодательства и авторского права Российской Федерации.	Требования ФГОС (ПК-16-21, 23, УК-2), Критерий 5 АИОР (п.1.5) , требования профессиональных стандартов 24.020, 24.079, 24.030

Планируемые результаты освоения программы 14.04.02 (продолжение)

P7	Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов инновационной профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОПК-1, УК-4, 5), Критерий 5 АИОР (пп.2.4,2.5)
P8	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (УК-6, ПК-1, ОПК-1), Критерий 5 АИОР (2.6), требования профессиональных стандартов 24.020, 24.079, 24.030
P9	Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать результаты профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ПК-11, 16, 17, УК-4, ОПК-3), Критерий 5 АИОР (п.2.2), требования профессиональных стандартов 24.020, 24.079, 24.030
P10	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации.	Требования ФГОС (ПК-18, 23, УК-3,6, ОПК-3), Критерий 5 АИОР (пп.1.6, 2.3), требования профессиональных стандартов 24.020, 24.079, 24.030

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа Инженерная школа ядерных технологий (ИЯТШ)
Направление подготовки (специальность) 14.04.02 Ядерные физика и технологии /
Технологии радиационной безопасности
Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерно-топливного цикла (ОЯТЦ)

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП
_____ Веригин Д. А.
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации
(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
0AM84	Попов Константин Евгеньевич

Тема работы:

Изучение генерации монохроматического излучения в субтерагерцовом диапазоне частот релятивистскими электронами при пролёте вблизи периодических мишеней	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	28.02.2020, №59-93/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	18.06.2020
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе (наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</p>	<p>Механизм генерации импульса ТГц излучения, геометрия пролёта вблизи многопластинной мишени и метаповерхностей, расчёт кинематических характеристик излучения по дисперсионному соотношению, численный расчёт в программном пакете CST Studio Suite, аналитический расчёт, создание первичной модели в формализме обобщённых поверхностных токов. Стендовые измерения с ГГц излучателем, параболическим телескопом и проведение спектроскопии излучения с использованием интерферометра Мартина-Паплетта, проведение экспериментов на выведенном пучке микротрона НИ ТПУ энергией электронов 6.1 МэВ.</p>
---	---

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Обзор литературы по тематике генерации ТГц излучения высокой интенсивности коротким пучком электронов; постановка задачи исследования, кинематический расчёт многослойной мишени, численное моделирование спектрально-угловых свойств излучения в программном пакете CST Studio Suite для дальней волновой зоны; создание первичной аналитической модели в формализме обобщённых поверхностных токов. В последствии верификация дисперсионного соотношения и спектрально-угловых свойств при взаимодействии пучка фотонов стендового излучателя с многослойной мишенью. Проведение эксперимента на выведенном пучке электронов микротрона ТПУ энергией 6,1 МэВ. Как финальный этап, обработка экспериментальных данных и анализ эксперимента, численного моделирования и первичной аналитической модели. Сравнение с механизмами излучения Вавилова-Черенкова и переходного излучения от металлического экрана.</p>
<p>Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Презентация в среде Microsoft office PowerPoint</p>
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Доцент отделения социально-гумантрных наук ШБИП к.т.н. Кашук И.В.</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Ассистент отделения ядерно-топливного цикла ИЯТШ к.ф.-м.н. Гоголева Т. С.</p>
<p>Раздел на иностранном языке</p>	<p>Старший преподаватель отделения иностранных языков ШБИП.</p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	
<p>Введение</p>	
<p>Литературный обзор</p>	
<p>Теоретическая часть</p>	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	27.01.2020
---	-------------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
В.н.с ИШФВП ТПУ	Науменко Г. А.	д.ф. – м.н.		27.01.2020

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ84	Попов Константин Евгеньевич		27.01.2020

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа Инженерная школа ядерных технологий (ИЯТШ)
Направление подготовки (специальность) 14.04.02 Ядерные физика и технологии /
Технологии радиационной безопасности
Уровень образования Магистратура
Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерно-топливного цикла (ОЯТЦ)
Период выполнения Весенний семестр 2019/2020 учебного года

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	18.06.2020
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
20.02.20	Подбор и изучение материалов по теме	5
22.02.20	Выбор направления исследования	5
24.02.20	Календарное планирование работ по проекту	5
03.03.20	Разработка методики эксперимента	10
24.03.20	Проведение численного моделирования в CST Studio Suite и создание первичной аналитической модели в формализме обобщённых поверхностных токов	10
3.04.20	Проведение экспериментов на выведенном электронном пучке микротрона НИ ТПУ	20
13.04.20	Обработка и анализ экспериментальных данных	20
20.04.20	Сравнение обработанных экспериментальных данных с численным моделированием и аналитической моделью	10
10.05.20	Оформление ВКР	10
11.06.20	Подготовка к защите ВКР	5

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
В.н.с. ИШФВП ТПУ	Науменко Г. А.	д.ф.-м.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Веригин Д.А.	к.ф.-м.н.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0AM84	Попов Константин Евгеньевич

Школа	ИЯТШ	Отделение (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	14.04.02 Ядерные физика и технологии/ Технологии радиационной безопасности

Тема ВКР:

Изучение генерации монохроматического излучения в субтерагерцовом диапазоне частот релятивистскими электронами при пролёте вблизи периодических мишеней	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объектом исследования является схема генерации импульса ТГц излучения высокой мощности коротким электронным пучком. Научное исследование было проведено в Томском политехническом университете, ИШФВП, лаборатория «Фотон». Каждое из помещений лаборатории имеет площадь более 35 м ² .
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	Ознакомление с нормативными документами: Трудовой кодекс РФ, ГОСТ Р 56906-2016, ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ, СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03, ГОСТ 12.1.005-88, СП 52.13330.2011, СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03, НРБ-99/2009, ОСПОРБ-99/2010, СанПиН 2.6.1.1192-03., ППБ 01-03., ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ., ГОСТ 12.4.009-83.
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Вредные факторы: неблагоприятный микроклимат, недостаточная освещенность, воздействие радиации (ВЧ, УВЧ, СВЧ и т.д.), повышенный уровень ионизирующих излучений в рабочей зоне. Опасные факторы: возможность поражения электрическим током, опасность возникновения пожара.
3. Экологическая безопасность:	– Объект исследования не оказывает негативного воздействия на гидросферу, литосферу и атмосферу, но может оказать влияние на флору и фауну.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	– Наиболее вероятным ЧС на рабочем месте является возникновение пожара.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЯТЦ	Гоголева Т. С.	к.ф.-м.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM84	Попов Константин Евгеньевич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0AM84	Попов Константин Евгеньевич

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	14.04.02 Ядерные физика и технологии/ Технологии радиационной безопасности

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г.Томска. Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Норма амортизационных отчислений на специальное оборудование.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные фонды 30%

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ конкурентных технических решение (НИ)	Расчёт конкурентноспособности SWOT-анализ
2. Формирование плана и графика разработки и внедрения НИ	Структура работ. Определение трудоёмкости. Разработка графика проведения исследования.
3. Составление бюджета научного исследования (НИ)	Расчёт бюджетной стоимости по проведению экспериментов на циклическом ускорителе релятивистских электронов, стендовом ГГц излучателе, численного моделирования в программном пакете CST Studio Suite.
4. Оценка ресурсной, финансовой, социальной, бюджетной эффективности НИ	Интегральный финансовый показатель. Интегральный показатель ресурсоэффективности. Интегральный показатель эффективности.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. Оценка конкурентноспособности НИ
2. Матрица SWOT
3. Диаграмма Ганта
4. Бюджет НИ
5. Основные показатели эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кащук Ирина Вадимовна	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM84	Попов Константин Евгеньевич		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 183 с., 37 рис., 32 табл., 31 источник, 3 приложения.

Ключевые слова: поляризационное излучение, дифракционное излучение, излучение Вавилова-Черенкова, многослойная мишень, продольная модуляция, отклоняющие структуры, интерферометр Майкельсона, интерферометр Мартина-Паплетта, дискретное преобразование Фурье.

Объект исследования: спектрально-угловые распределения поляризационного излучения при пролёте заряженной частицы вблизи периодических мишеней (многослойная мишень, метаповерхность, гофрированная диэлектрическая структура).

Цель исследования: экспериментальная проверка спектрально-угловых распределений поляризационного излучения от многослойной проводящей призмы, диэлектрической призмы, а также исследование механизма отклонения банчиrowанного релятивистского пучка электронов при транспортировке внутри диэлектрической гофрированной структуры.

В процессе исследования проводились: численное моделирование спектрально-угловых распределений дифракционного излучения и излучения Вавилова-Черенкова, измерение углового распределения излучения реальных фотонов на тестовом ГГц-м источнике, измерение спектрально-угловых распределений дифракционного излучения и излучения Вавилова-Черенкова на выведенном пучке электронов микротрона НИ ТПУ, эксперименты по изучению возможности создания пассивных отклоняющих структур банчиrowанного пучка электронов.

В результате исследования были измерены спектрально-угловые распределения дифракционного излучения от многослойной проводящей призмы, проведённое численное моделирование описывает поведение экспериментальных зависимостей в пределах ошибки измерения, подтверждено явление отклонения банчируемого релятивистского пучка электронов при транспортировке внутри диэлектрической гофрированной структуры.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: схема генерации дифракционного излучения от многослойной проводящей призмы позволяет получить спектральную интенсивность излучения в 2.08 раз больше чем схема генерации излучения Вавилова-Черенкова от диэлектрической призмы.

Степень внедрения: проведены исследования.

Область применения: инфракрасная спектроскопия, прикладные медицинские исследования, ускорительная физика и техника.

Экономическая эффективность/значимость работы: использование последовательности пучков заряженных частиц для генерации дифракционного излучения в геометрии пролёта вблизи многослойной мишени позволит создать интенсивный источник монохроматического суб-ТГц и ТГц излучения, а диэлектрические гофрированные структуры частично заменить элементы магнитной оптики линейных ускорителей, особенно в медицинских применениях.

В будущем планируется проведение экспериментов с японскими коллегами на линейном ускорителе KEK-LUCX, работающем в режимах генерации одного сгустка и последовательности, до 4-х, сгустков электронов, для исследования механизма отклонения банчируемого релятивистского пучка электронов при транспортировке внутри диэлектрической гофрированной структуры и внутри канала многослойной конической проводящей мишени.

ABSTRACT

There are 183 p., 37 fig., 32 tables, 31 sources, 3 app. in the master thesis.

Key words are polarized radiation, diffraction radiation, Cherenkov radiation, multilayer target, longitudinal modulation, deflecting cavities, Michelson interferometer, Martin-Puplett interferometer, discrete Fourier transformation.

Research object is experimental verification of polarized radiation spectral-angular distribution characteristics from periodic targets (multilayer target, metasurface, corrugated dielectric target).

The purpose of the study is the experimental verification of polarized radiation spectral-angular characteristics from multilayer conductive prism and dielectric prism, as well as investigation of relativistic electron bunch deflection nature, while it is transported through dielectric corrugated capillary.

At first, numerical modelling of the diffraction radiation and Cherenkov radiation spectral-angular distributions were performed. Secondly, calculated spectral-angular distribution were experimentally verified on the bench GHz quasi-monochromatic radiation source and experiments with extracted electron beam from TPU microtron accelerator were carried out. Finally, proof-of-principle experiments in order to demonstrate a possibility to create passive deflecting cavities were carried out on compact linear electron accelerator KEK-LUCX in Japan.

As results of the master thesis, diffraction radiation spectral-angular distribution from multilayer prism was measured, as well as deflection of relativistic electron bunch was confirmed, while it was transported through corrugated dielectric capillary. Experimental results are in good agreement with the numerical modeling within measurement errors.

The main constructive, technological and operational characteristics are followings: spectral intensity yield of diffraction radiation from multilayer conductive prism is 2.08 times higher than Cherenkov radiation from dielectric prism respectively.

Research was carried out.

The main fields of application are infra-red spectroscopy, biology, accelerator physics and technique.

Economic efficiency/ research impact is usage of the diffraction radiation from multilayer prism by charge particle bunch train to create intense monochromatic sub-THz and THz radiation source. Also it is possible to implement corrugated dielectric capillary to create new generation of linear accelerator magnet optics.

Perspective is to carry out experiments on LUCX accelerator to investigate longitudinal modulation of relativistic electron bunch, while it is transported through multilayer target. LUCX accelerator can operate in single bunch and multi-bunch modes.

Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

Поляризационное излучение – это вторичное электромагнитное излучение, возникающее как следствие динамической поляризации атомов мишени кулоновским полем заряженной частицы.

Дифракционное излучение – это тип поляризационного излучения, возникающий при пролёте заряженной частицы вблизи оптической неоднородности.

Излучение Вавилова-Черенкова – это излучение, возникающее при движении электрического заряда (частицы) в среде, со скоростью, превышающей фазовую скорость света в рассматриваемой среде.

Микротрон – это циклический резонансный ускоритель электронов.

Интерферометр – это измерительный прибор, действие которого основано на явлении интерференции.

Продольная модуляция – это формирование продольной плотности заряда сгустка электронов под воздействием физических явлений, описываемых математической моделью.

ТГц излучение – это электромагнитное излучение, спектр которого находится между инфракрасным и СВЧ диапазонами.

В данной работе применены следующие обозначения:

ДИ – дифракционное излучение.

ИВЧ – излучение Вавилова-Черенкова.

ИМП – интерферометр Мартина-Паплетта.

ИК-диапазон – инфракрасный-диапазон.

Оглавление

Введение.....	21
1 Обзор литературы.....	24
2 Теоретическая часть.....	27
2.1 Дисперсионное соотношение для геометрии генерации ДИ от многослойной мишенью	27
2.2 ИВЧ от диэлектрической призмы.....	30
2.2.1 Угловое распределение ИВЧ	30
2.2.2 Спектральное распределение ИВЧ	32
2.3 Многослойная мишень как источник квази-ИВЧ.....	35
2.4 Расчет экспериментальных условий для постановки эксперимента на микротроне НИ ТПУ	36
2.4.1 Микротрон НИ ТПУ	36
2.4.2 Влияние ТЕ мод плоского волновода на спектр излучения.....	38
2.4.3 Модуляция спектра излучения последовательностью сгустков	39
2.4.4 Спектроскопия излучения интерферометром Мартина-Папплетта	40
2.5 Алгоритм обработки экспериментальных данных	44
3 Численное моделирование эксперимента.....	46
3.1 Измерения на стендовом ГГц излучателе.....	46
3.2 Моделирование излучения на выведенном пучке микротрона.....	50
4 Экспериментальная часть.....	53
4.1 Измерение угловых зависимостей на стендовом ГГц-м излучателе	53
4.2 Постановка эксперимента на микротроне	62
4.2.1 Общая схема постановки измерений	62
4.2.2 Измерения спектрально-угловых характеристик ИВЧ.....	63
4.2.3 Измерение спектрально-угловых характеристик ДИ от многослойной призмы.....	69
5 Исследование пассивных отклоняющих диэлектрически структур	75
5.1 Пучок линейного ускорителя КЕК-LUCX	75
5.2 Схема эксперимента.....	76
5.3 Результаты эксперимента.....	79

5.3.1 Алгоритм обработки данных	79
5.3.2 Измерения с пучком электронов пикосекундной длительности	80
5.3.3 Измерения с пучком электронов фемтосекундной длительности	82
Заключение	84
6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	85
6.1 Введение.....	85
6.2 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережений	86
6.2.1 Анализ конкурентных технических решений.....	86
6.2.2 SWOT-анализ.....	88
6.3 Планирование научно-исследовательской работы.....	90
6.3.1 Структура работ в рамках научного исследования.....	90
6.3.2 Определение трудоёмкости выполнения работ	92
6.3.3 Разработка графика проведения исследования.....	93
6.4 Бюджет научного исследования	98
6.4.1 Расчёт материальных затрат	99
6.4.2 Расчёт амортизации специального оборудования для научного исследования	100
6.4.3 Основная заработная плата труда исполнителей научного исследования	103
6.4.4 Дополнительная заработная плата исполнителей научного исследования	106
6.4.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	107
6.4.6 Накладные расходы	107
6.5 Формирование бюджета затрат научного исследования	109
6.6 Определение финансовой, бюджетной экономической эффективности исследования.....	110
6.6.1 Интегральный показатель финансовой эффективности	110
6.6.2 Интегральный показатель ресурсоэффективности	111
6.6.3 Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки.....	112

7 Социальная ответственность.....	114
7.1 Введение.....	114
7.2 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	116
7.2.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства.....	116
7.2.2 Эргономические требования к рабочей зоне	117
7.3 Производственная безопасность	120
7.3.1 Профессиональная социальная безопасность.....	120
7.3.2 Анализ вредных и опасных факторов, создаваемых объектом исследования	120
7.3.3 Анализ вредных и опасных факторов, возникающие в лаборатории при проведении исследований.....	121
7.3.4 Вредные факторы.....	122
7.3.5 Опасные факторы.....	127
7.3.6 Мероприятия по защите от действия опасных и вредных факторов .	129
7.4 Экологическая безопасность.....	133
7.4.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду	133
7.4.2 Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду	134
7.4.3 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды	134
7.5. Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	135
7.5.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследования	135
7.5.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований.....	135
7.5.3 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС	136
7.6 Список нормативных документов.....	137
7.7 Заключение по разделу “Социальная ответственность”.....	139
Выводы	140
Список публикаций студента.....	142
Список литературы	143
Приложение А	147
Приложение Б	159

Приложение С.....	162
-------------------	-----

Введение

При прямолинейном и равномерном пролёте заряженной частицы в неоднородной среде или вблизи неоднородной среды возникает динамическая поляризация атомов среды, то есть возникают поляризационные токи, являющиеся источником вторичного электромагнитного поля. Данное вторичное электромагнитное поле носит название поляризационного излучения. Дифракционное излучение (далее ДИ) [1] и излучение Вавилова-Черенкова (далее ИВЧ) при пролёте заряженной частицы вблизи мишени [2] являются частными случаями поляризационного излучения.

Интенсивность резонансных ДИ и ИВЧ в инфракрасном диапазоне (далее ИК-диапазон) сравнима с интенсивностью переходного излучения (далее ПИ), широко применяемого в физике высоких энергий и диагностике пучков заряженных частиц. В отличие от переходного излучения (ПИ) дифракционное излучение (ДИ) генерируется без непосредственного взаимодействия заряженной частицы со средой, а только её кулоновским полем, что и вызывает динамическую поляризацию атомов мишени.

Генерация ДИ и ИВЧ в резонансных условиях (вблизи периодической структуры) коротким электронным сгустком обладает необходимыми свойствами для создания ГГц–ТГц источника на основе компактных линейных [3] или циклических ускорителей электронов (например микротрона [4]), а именно:

1. высокой интенсивностью излучения;
2. перестраиваемостью спектра;
3. высокой монохроматичностью излучения $\sim 1\%$ и выше.

Экспериментальные данные, представленные в работе [5, 6], подтверждают выше перечисленные характеристики. В работе [7] был рассмотрен случай генерации ПИ коротким электронным сгустком $\sigma_z = 7.5$ мкм от многослойной конической мишени, чья геометрия позволяет генерировать излучение до ГВт мощности в импульсе. Однако первый же взгляд на геометрию генерации, даёт понять, что мишень представляет из себя набор плоских волноводов с градиентом длины в поперечном направлении относительно вектора скорости электронного сгустка. Дифракционное излучение от периодической структуры волноводов будет иметь строго фиксированный спектр, заданный геометрическими размерами волновода, то есть выступать искусственным фильтром, что даёт преимущество в создании источника сверх-излучения [7, 8], создаваемого последовательностью электронных сгустков (в англоязычной литературе носит название “train” или “pre-bunched beam” в дальнейшем будет использоваться транслитерация слова – “трэин”).

Кроме вышеуказанного свойства волноводов, имеет смысл рассмотреть многослойную призму как мишень квази-ИБЧ. Также в связи с существенным вкладом резонансной структуры трэина в спектрально-угловые характеристики излучения, целесообразно провести эксперименты на ускорителе, работающем в режиме генерации одного электронного сгустка. Такие исследования были проведены на линейном ускорителе KEK-LUCX (организация КЕК, г. Цукуба, Япония).

Целью данной работы является экспериментальная проверка спектрально-угловых зависимостей интенсивности излучения от многослойной призмы на микротроне НИ ТПУ, численное моделирование спектрально-угловых зависимостей в программном пакете CST Studio Suite для параметров пучка электронов микротрона НИ ТПУ и сравнение со спектрально-угловыми зависимостями ИБЧ от диэлектрической тефлоновой призмы.

Задачи, которые необходимо выполнить для достижения цели:

1. литературный обзор экспериментальных и теоретических работ по теме магистерской диссертации;
2. расчёт кинематических характеристик излучения от многослойной и тефлоновой призм;
3. написание программного кода для обработки экспериментальных данных на языке программирования Python 3.x;
4. численное моделирование в программном пакете Computer Simulation Technology Studio Suite (CST Studio Suite);
5. расчёт эксперимента на микротроне НИ ТПУ;
6. проведение измерений на экспериментальном стенде;
7. постановка эксперимента на микротроне НИ ТПУ;
8. обработка экспериментальных данных;
9. анализ сходимости экспериментальных данных с численным моделированием;
10. формулирование выводов.

В перспективе рассмотреть модуляцию пучка электромагнитным полем излучения от многослойной призмы для нужд создания компактного ТГц лазера на свободных электронах и пассивных отклоняющих диэлектрических структур на основе генерации ИВЧ в диэлектрической гофрированной структуре.

1 Обзор литературы

Поляризационное излучение, возникающее при пролёте заряженной частицы вблизи периодической решётки (в англоязычной литературе “grating”), известное как излучение Смита-Парселла [1] (далее ИСП), является хорошо изученным. ИСП применяется для создания мониторов продольного профиля пучков электронов [9] и монохроматического источника ТГц излучения [3]. В работах [5, 10] экспериментально и теоретически исследованы резонансное переходное излучение (далее GTR), возникающее при пересечении пучком заряженных частиц периодической решётки, и резонансное дифракционное излучение (далее GDR), возникающее при пролёте пучка заряженных частиц вблизи наклонной периодической решётки, для целей создания перестраиваемого источника монохроматического ТГц излучения высокой интенсивности. Преимуществом GDR и GTR над ИСП является перестраиваемость спектра излучения, не требующая замены мишени, а лишь изменение угла ориентации мишени относительно направления движения пучка заряженных частиц, и увеличение степени монохроматизации с ростом порядка дифракции периодической решётки [5]. Кроме того, GDR [10] является невозмущающим источником ТГц излучения, так как частица пролетает вблизи периодической решётки. В совокупности все факторы позволяют рассматривать GDR, как наилучший вариант ТГц источника от мишеней, обладающих периодичностью вдоль одного направления.

В последние 10 лет исследования характеристик поляризационного излучения от периодических структур получили новый виток развития в направлении метаповерхностей, фотонных и плазмонных кристаллов [11, 12] (2D-структур, двумерных-структур, точечных мишеней), а также многослойных проводящих мишеней [7, 8]. Данные типы мишеней обладают практическим интересом, так как за счёт дополнительных резонансных условий, налагаемых 2D и 3D структурой, приводят к высокой степени монохроматичности излучения, ГВт-й мощности излучения в импульсе, продольной модуляции пучка заряженных частиц [7], к перестраиваемости спектральной плотности излучения. В случае 2D структур проведено много численных моделирований для задач эффективного контроля характеристик излучения в ТГц диапазоне частот [11, 12]. Имеется только две экспериментальные работы по исследованию ИСП от метаповерхностей [13, 14], в то время как полностью разработанная аналитическая модель отсутствует.

Для многослойных мишеней имеется теоретическое исследование [7], где рассмотрена коническая многослойная мишень, в которой генерируется когерентное переходное излучение коротким электронным пучком, поперечные размеры которого много меньше продольного размера $\sigma_{x,y} \ll \sigma_z$. В работе [8] представлены экспериментальные результаты, проведённые с короткими сгустками электронов $\sigma_z = 7.5$ мкм и экспериментально подтверждена возможность генерации резонансного ПИ, чья мощность в импульсе излучения в 10 раз выше обычного ПИ, и предложена плоская геометрия многослойной мишени для генерации линейно-поляризованного ПИ, но не достигнута ГВт пиковая мощность излучения в импульсе. Также имеется ряд работ по созданию ТГц источника на основе излучения Вавилова-Черенкова при пролёте пучка электронов вблизи диэлектрической призмы [2] и в канале диэлектрического конуса [15].

3D структуры имеют практический интерес в создании пассивных диэлектрических отклоняющих [16, 17] и ускоряющих структур [18] (в англоязычной литературе “Dielectric Wakefield Acceleration” или “DWA”, в русскоязычной литературе “ускорение в кильватерном поле”) банчируемых релятивистских пучков электронов. В большей степени исследован вопрос транспортировки постоянных нерелятивистских пучков, ток которых составляет порядка 10 кА. В работе [16] рассмотрена транспортировка постоянного и банчируемого электронных пучков, токи которых равны 20 кА, энергией 350-800 кэВ диэлектрическом канале, где основным механизмом транспортировки выступает поверхностный пробой стенок диэлектрического канала, из-за “высаживания” части пучка в канале, в следствие чего часть ионов увлекается пучком и происходит стягивание пучка к центру канала, что позволяет транспортировать пучок без применения магнитной оптики. В работе [19] рассмотрено отклонение 10 кэВ-го постоянного пучка электронов током 1кА при пролёте вдоль диэлектрической пластины и корругированной структуры (решётки ИСП). Отклонение происходит за счёт наведения электрического заряда на поверхности за счёт высаживания малой части пучка, достаточной для электризации, но не достаточной для возникновения поверхностного пробоя. Стоит упомянуть, что вопрос отклонения релятивистских банчируемых пучков электронов не затрагивался в литературе и экспериментально исследован не был.

$$\Delta = L_1 - L_2, \quad (1.2)$$

где L_1 – оптический путь первого луча, L_2 – оптический путь второго луча.

$$L_1 = d_1 + x + r_2 \quad (1.3)$$

$$L_2 = d_2 + x \quad (1.4)$$

$$d_2 = \frac{d}{\cos(\theta)}, \quad (1.5)$$

где d – период структуры, θ – угол ориентации мишени

$$d_1 = d \cdot \operatorname{tg}(\alpha), \quad (1.6)$$

где α – угол у основания призмы.

$$L_1 - L_2 = \frac{d \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}{\vartheta} + r_2 - \frac{d}{\beta \cdot \cos(\theta)}, \quad (1.7)$$

где β – скорость частицы в единицах скорости света в вакууме.

$$\alpha + \theta + \zeta + \eta + \pi/2 = \pi, \quad (1.8)$$

где η – угол детектирования излучения.

$$r_2 = r_1 \cdot \cos(\alpha + \theta + \eta) \quad (1.9)$$

$$r_2 = d \cdot \frac{\cos(\alpha + \theta + \eta)}{\cos(\alpha)} \quad (1.10)$$

$$\frac{d \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}{\vartheta} + d \cdot \frac{\cos(\alpha + \theta + \eta)}{\cos(\alpha)} - \frac{d}{\beta \cdot \cos(\theta)} = \pm k \cdot \lambda \quad (1.11)$$

$$\lambda = \pm \frac{d}{k} \cdot \left(\frac{\operatorname{tg}(\alpha)}{\vartheta} + \frac{\cos(\alpha + \theta + \eta)}{\cos(\alpha)} - \frac{1}{\beta \cdot \cos(\theta)} \right) \quad (1.12)$$

$$\eta = \arccos \left(\cos(\alpha) \cdot \left\{ \pm \frac{k \cdot \lambda}{d} - \frac{\operatorname{tg}(\alpha)}{\vartheta} + \frac{1}{\beta \cdot \cos(\theta)} \right\} \right) - (\alpha + \theta) \quad (1.13a)$$

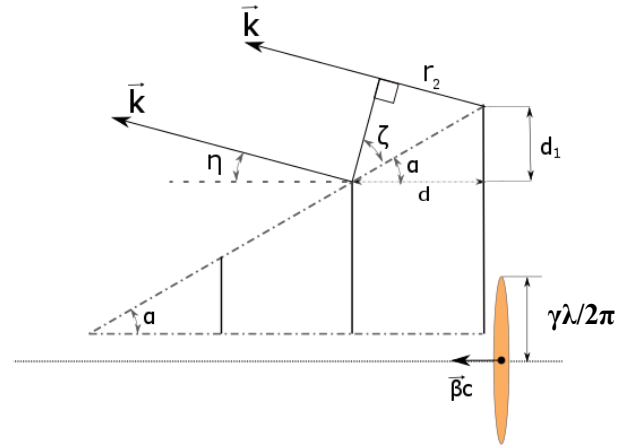
Необходимо уточнить, что дисперсионное соотношение (1.13a) изменит свой вид для измерений с источником реальных фотонов:

$$\eta = \arccos \left(\cos(\alpha) \cdot \left\{ \pm \frac{k \cdot \lambda}{d} - \frac{\operatorname{tg}(\alpha)}{\vartheta} + \frac{1}{\cos(\theta)} \right\} \right) - (\alpha + \theta) \quad (1.13b)$$

Повторная проверка вывода дисперсионного соотношения проводилась отдельным решением задачи для параллельного пролёта и получением предельного случая для угла ориентации мишени $\theta = 0^\circ$ для соотношения (1.13a).



(a)



(б)

Рисунок 2 – Схема генерации ДИ при параллельном пролёте частицы вблизи многослойной призмы: (а) – фотография многослойной призмы, (б) – схема генерации ДИ при параллельном пролёте

Формула для расчёта предельного случая в геометрии параллельного пролёта (см. рисунок 2б) представлена соотношением (1.14).

$$\eta = \arccos \left(\cos(\alpha) \cdot \left\{ \pm \frac{k \cdot \lambda}{d} - \operatorname{tg}(\alpha) + \frac{1}{\beta} \right\} \right) - \alpha \quad (1.14)$$

Параметры многослойной призмы, используемой в эксперименте на выведенном пучке микротрона: материал мишени – стеклотекстолит, толщина мишени $\Delta d = 1$ мм, $\alpha = 38.1^\circ$, длина катета $L = 185$ мм, высота призмы $H = 85$ мм, $d = 26.5$ мм.

Далее рассмотрен вывод выражения для расчёта углового распределения ИВЧ от диэлектрической призмы [2].

2.2 ИВЧ от диэлектрической призмы

2.2.1 Угловое распределение ИВЧ

Традиционно считается, что ИВЧ генерируется при пролёте заряженной частицы в среде со скоростью, превышающей фазовую скорость света в данной среде [21], но в работе [2] было показано, что ИВЧ может возникать и при пролёте заряженной частицы вблизи диэлектрической мишени, в частности, получены аналитические выражения для спектрально-угловой зависимости ИВЧ от трехгранной призмы.

Геометрия генерации ИВЧ от диэлектрической призмы представлена на рисунке 3.

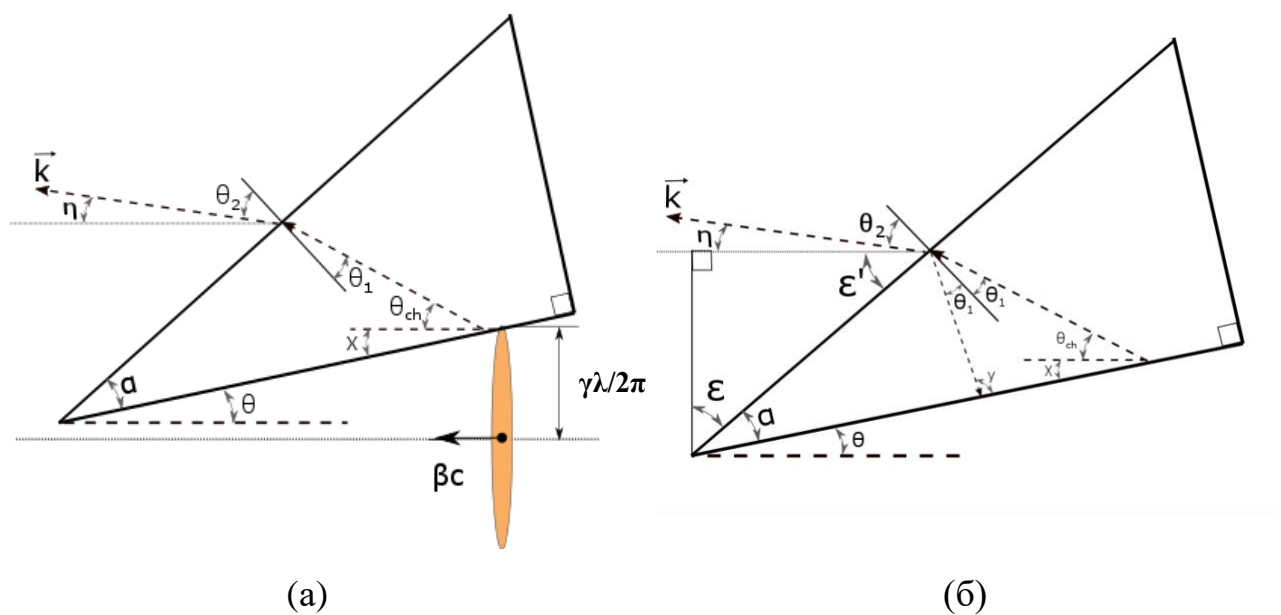


Рисунок 3 – К расчёту углового распределения ИВЧ:

(а) – геометрия генерации ИВЧ от диэлектрической призмы,

(б) – увеличенный рисунок 3а

Так как само излучение генерируется в среде, а детектирование происходит в вакууме/воздухе, то необходимо учитывать преломление излучения на выходной грани призмы.

Угол выхода ИВЧ в среде имеет следующий вид:

$$\theta_{ch} = \arccos\left(\frac{\cos(\theta)}{\beta \cdot n}\right) - \theta, \quad (1.15)$$

где θ_{ch} – угол генерации ИВЧ в среде.

Закон Снеллиуса позволяет вычислить угол преломлённого излучения из среды в вакуум/воздух:

$$n \cdot \sin(\theta_1) = \sin(\theta_2), \quad (1.16)$$

где n – показатель преломления среды, θ_1 – угол падения ИВЧ относительно нормали к выходной грани мишени, θ_2 – угол преломленного ИВЧ относительно нормали к выходной грани мишени.

Выполнив геометрические преобразования углов, можно определить угол наблюдения ИВЧ относительно направления движения заряженной частицы:

$$\pi/2 - \chi + \pi/2 + \theta = \pi, \quad (1.17)$$

$$\chi = \theta \quad (1.18)$$

$$2 \cdot \theta_1 + \theta_{ch} + \theta + y = \pi, \quad (1.19)$$

$$(\pi/2 - y) + (\pi/2 - \theta_1) + \alpha = \pi, \quad (1.20)$$

$$y = \pi/2 - \theta_1 + \alpha \quad (1.21)$$

$$\theta_1 = \pi/2 - \theta_{ch} - \theta - \alpha \quad (1.22)$$

$$\theta_1 = \pi/2 - \arccos\left(\frac{\cos(\theta)}{n \cdot \beta}\right) - \alpha \quad (1.23)$$

$$\theta_2 = \arcsin\left(n \cdot \sin\left(\arcsin\left(\frac{\cos(\theta)}{n \cdot \beta}\right) - \alpha\right)\right) - (\alpha + \theta) \quad (1.24)$$

$$\varepsilon = \pi/2 - (\alpha + \theta) \quad (1.25)$$

$$\varepsilon' = \alpha + \theta \quad (1.26)$$

$$\varepsilon' + \eta + \theta_2 = \pi/2 \quad (1.27)$$

$$\beta = \sqrt{1 - 1/\gamma^2} \quad (1.28)$$

где γ – лоренц-фактор.

Вид зависимости угла детектирования ИВЧ от угла ориентации диэлектрической призмы:

$$\eta = \arccos \left(n \cdot \sin \left(\arcsin \left(\frac{\cos(\theta)}{n \cdot \beta} \right) - \alpha \right) \right) - (\alpha + \theta) \quad (1.29)$$

Параметры прямоугольной равнобедренной призмы, используемой в эксперименте на выведенном пучке микротрона: материал мишени – тефлон, $n = 1.433 \pm 0.007$ [22], $\alpha = 45^\circ$, длина катета $L = 185$ мм, высота призмы $H = 75$ мм.

2.2.2 Спектральное распределение ИВЧ

Угловое распределение ИВЧ от тефлоновой призмы с указанными в подразделе 1.2.1 параметрами мишени при пролёте одного электрона определяется аналитическим выражением (16) в работе [2]. В эксперименте детектируется ИВЧ в когерентном режиме, модулированном частотой СВЧ системы микротрона, то есть трэином. В когерентном режиме, когда длина волны излучения равна или больше продольного размера пучка заряженных частиц, спектральное распределение в пренебрежении низкочастотной части спектра имеет вид:

$$\frac{dW}{d\omega} = \frac{dW_e}{d\omega} \cdot \{N_e \cdot F_{incoh}(\omega) + N_e \cdot (N_e - 1) \cdot F_{coh}(\omega)\}, \quad (1.30)$$

где N_e – число электронов в пучке, $dW_e/d\omega$ – спектральное распределение от одного электрона.

Выражение 3-мерного форм-фактора можно разделить на две независимые друг от друга части: продольную и поперечную.

$$F_{incoh}(\omega) = F_{incoh}^{long}(\omega) \cdot F_{incoh}^{trans}(\omega) \quad (1.31a)$$

$$F_{coh}(\omega) = F_{coh}^{long}(\omega) \cdot F_{coh}^{trans}(\omega) \quad (1.31b)$$

где $F_{incoh}^{long}(\omega)$, $F_{coh}^{long}(\omega)$ – продольная составляющая 3-мерного форм-фактора для некогерентной и когерентной частей спектра, $F_{incoh}^{trans}(\omega)$ и $F_{coh}^{trans}(\omega)$ – поперечная составляющая 3-мерного форм-фактора для некогерентной и когерентной частей спектра.

Спектральное распределение модулируется продольной составляющей 3-мерного форм-фактора, поэтому, в дальнейшем, только он и будет учтён. Подробный вывод 3-мерного форм-фактора рассмотрен в работе [23]. Ниже будут указаны только конечные выражения, применяемые для качественного анализа и вычислений в магистерской диссертации.

$$\frac{dW_{coh}}{d\omega} \approx N_e^2 \cdot F_b(\omega) \cdot G_{train}(\omega) \cdot \frac{dW_e}{d\omega}, \quad (1.32)$$

где $F_b(\omega)$ – продольный форм-фактор пучка электронов, $G_{train}(\omega)$ – форм-фактор трэина.

Интенсивность $F_{incoh}(\omega)$ части спектра в N_e раз меньше чем $F_{coh}(\omega)$, поэтому некогерентной частью можно пренебречь как бесконечно малой величиной по сравнению с когерентной частью спектра.

$$F_b(\omega) = \exp\left(-\omega^2 \cdot \frac{\sigma_z^2}{c^2}\right), \quad (1.33)$$

где σ_z – продольный размер пучка электронов, ω – частота излучения, c – скорость света в вакууме.

$$G_{train}(\omega) = \frac{1}{N_b^2} \cdot \left(\frac{\sin(N_b \omega \Lambda / 2c)}{\sin(\omega \Lambda / 2c)} \right)^2, \quad (1.34)$$

где Λ – расстояние между пучками электронов, N_b – число пучков в трэине.

$$F(\omega) = F_b(\omega) \cdot G_{train}(\omega) \quad (1.35)$$

На рисунке 4 представлена зависимость форма-фактора от частоты генерируемого излучения для следующих параметров трэина электронных сгустков: $\sigma_z = 5$ мм, $N_b = N = 1, 10$ сгустков, $\Lambda = 114$ мм.

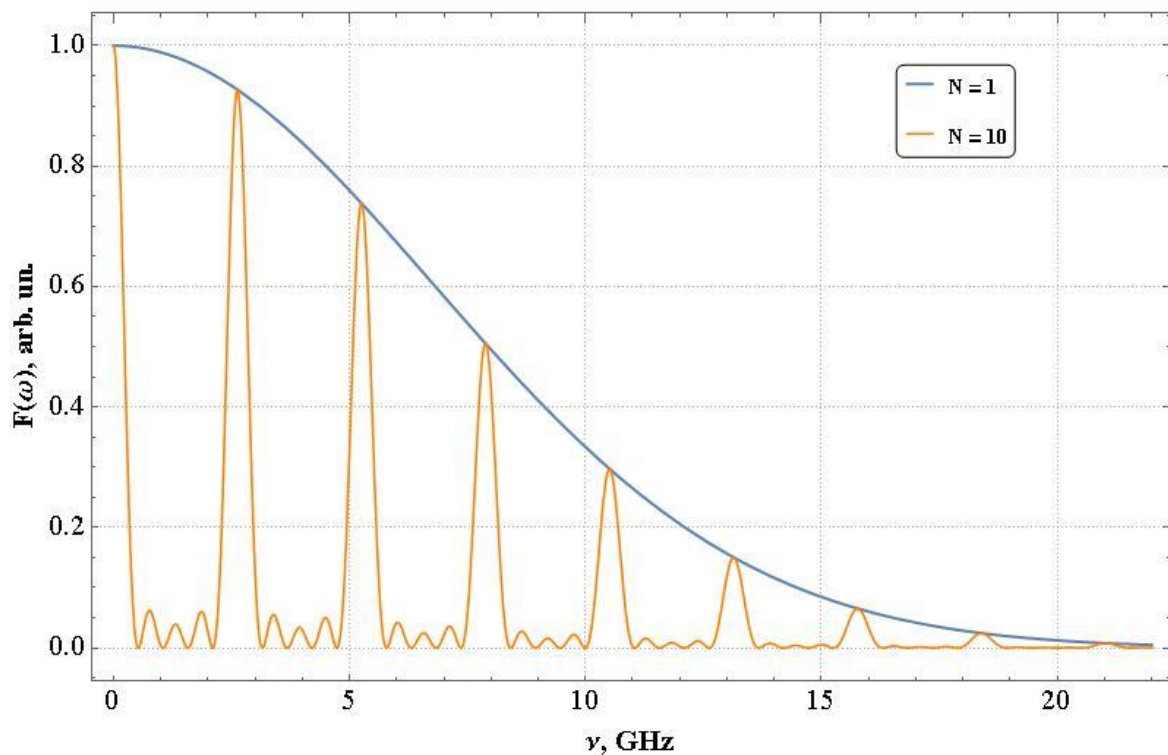


Рисунок 4 – Форм-фактор трэина электронных сгустков: $\sigma_z = 5$ мм,

$$N_b = N = 1, 10 \text{ сгустков, } L = 114 \text{ мм}$$

На рисунке 4 ярко выражены отдельные спектральные линии, обусловленные резонансной структурой трэина электронных сгустков, когда спектр от одного сгустка является широкополосным. Необходимо уточнить, что когерентная часть спектра от трэина будет иметь вид, показанный на рисунке 4, если широкополосные вспышки не накладываются друг на друга во времени.

2.3 Многослойная мишень как источник квази-ИВЧ

При условии, что ширина зазора между пластинами меньше, чем длина импульса излучения одного банча, в предположении аппроксимации импульса излучения распределением Гаусса, можно рассмотреть ДИ как квази-ИВЧ от анизотропной среды с тензором диэлектрической проницаемости. Для электронного сгустка микротрона длиной $\sigma_z = (8.16 \pm 0.05)$ мм длительность вспышки будет порядка длины банча, когда ширина зазора между слоями мишени равняется $d = 27$ мм, следовательно рассмотрение многослойной мишени как источника квази-ИВЧ имеет место быть.

Следствием тензорного характера показателя преломления является тензорный характер диэлектрической проницаемости. В предположении отсутствия поглощения излучения в суб-ТГц диапазоне частот, имеет место соотношение:

$$n_{eff}(\theta) = \sqrt{\varepsilon_{eff}(\theta)}, \quad (1.36)$$

где $\varepsilon_{eff}(\theta)$ – эффективная диэлектрическая проницаемость, θ – угол ориентации мишени.

Следствием этого является эффективный показатель преломления многослойной мишени для связывания угла распространения квази-ИВЧ и угла ориентации мишени. Преобразование формулы (1.29) приводит к трансцендентному уравнению:

$$\arcsin\left(\frac{\cos(\eta_{qch} + \alpha + \theta)}{n_{eff}}\right) = \arcsin\left(\frac{\cos(\theta)}{n_{eff} \cdot \beta}\right) - \alpha \quad (1.37)$$

Эффективные показатели преломления можно определить из экспериментальных данных, измерив угол распространения квази-ИВЧ η_{qch} при заданном угле ориентации мишени θ .

2.4 Расчет экспериментальных условий для постановки эксперимента на микротроне НИ ТПУ

2.4.1 Микротрон НИ ТПУ

Микротрон – это резонансный циклический ускоритель электронов до релятивистских энергий, в котором ведущее магнитное поле и СВЧ-частота ускоряющего поля постоянны. В микротроне изменяется период обращения сгустка электронов на каждом обороте в магнитном поле, чтобы через каждый оборот сгусток приходил в резонатор (ускоряющий промежуток) в одинаковую фазу ускорения СВЧ поля.

СВЧ поле генерируемое СВЧ системой микротрона (1) распространяется по волноводному тракту (2) в резонатор (ускоряющий промежуток) (3), расположенный внутри дипольного магнита (4). Термокатод микротрона расположен на поверхности резонатора (3). Термоэлектроны захватываются в цикл ускорения резонатора (3), начиная двигаться по окружностям, имеющим 1 точку соприкосновения – внутри резонатора. На каждом обороте пучок электронов приобретает энергию, равную энергии покоя электрона, равную 0.511 МэВ. На последнем обороте, электроны попадают в магнитный шунт (6) и выводятся из микротрона в вакуумный тракт пучка, на котором расположены элементы магнитной оптики – дублеты квадрупольных линз (7) и поворотный магнит (8). После прохождения через магнитную оптику происходит экстракция пучка через закреплённое во фланце выводного патрубка (9) бериллиевое (Be) окошко (10) толщиной 50 мкм. На финальной стадии пучок электронов выводится в размещённое на оптическом столе экспериментальное оборудование (11).

Схема ускорительного зала с микротроном представлена на рисунке 5.

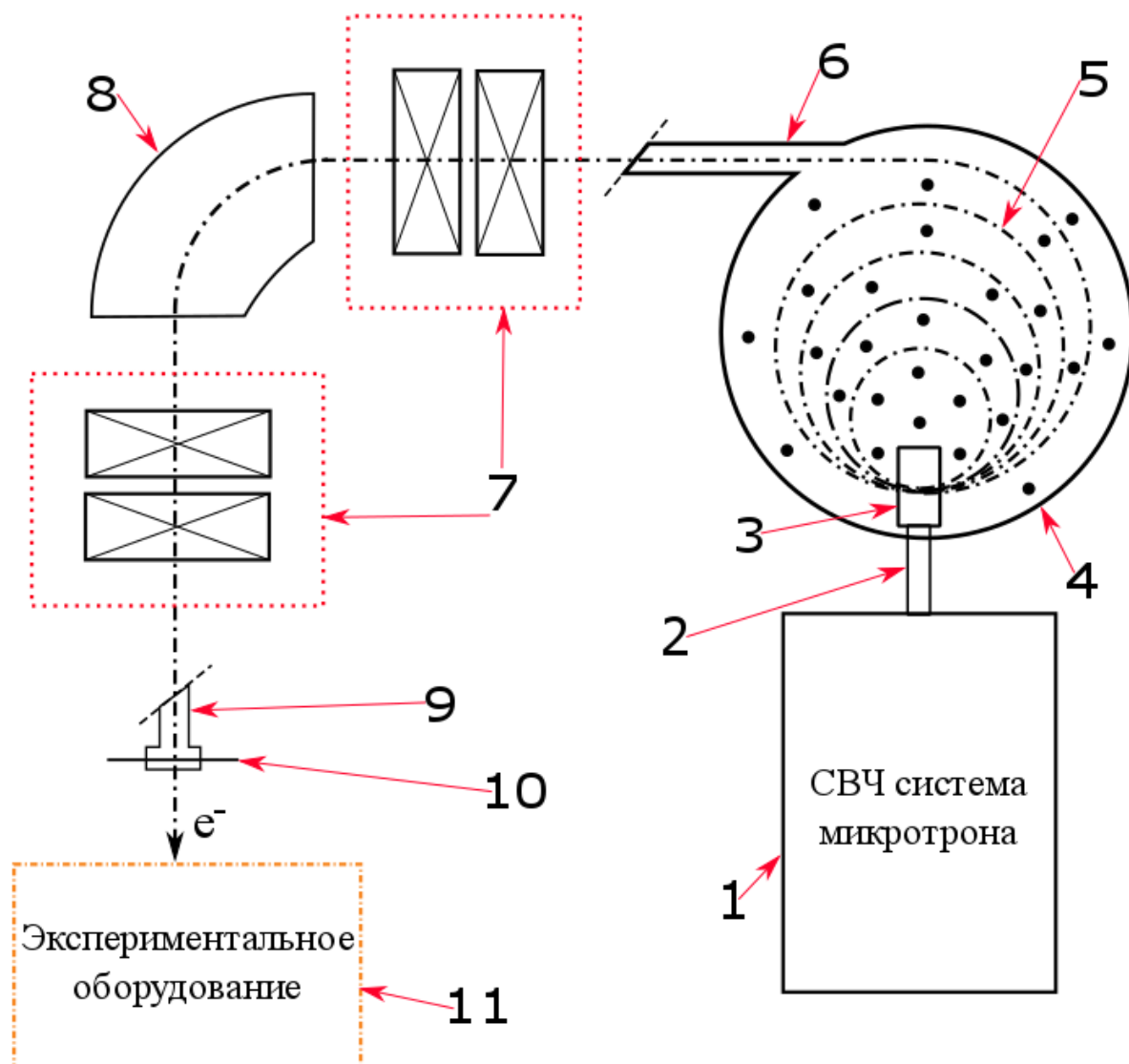


Рисунок 5 – Схема ускорительного зала с микротроном: 1 – СВЧ система микротрона, 2 – волноводный тракт, 3 – резонатор (ускоряющий промежуток), 4 – дипольный магнит, 5 – орбита сгустка электронов, 6 – магнитный шунт, 7 – дублиеты квадрупольных линз, 8 – поворотный магнит, 9 – выводной патрубок, 10 – бериллиевое (Be) окно толщиной 50 мкм, 11 – экспериментальное оборудование

2.4.2 Влияние TE мод плоского волновода на спектр излучения

Эксперимент планировался на выведенном пучке микротрона [24], с параметрами, представленными в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры выведенного пучка микротрона

Энергия электронов, E	6.1 МэВ
Лоренц-фактор, γ	12
Длительность макроимпульса, τ	4 мкс
Частота макроимпульсов, ν_{macro}	1~ 10 Гц
Длина сгустка электронов, σ_z	8.16 ± 0.05 мм
Населённость электронов в сгустке, N_e	10^8
Число сгустков в макроимпульсе (пучке), N_b	10^4
Расстояние между сгустками, Λ	114 мм
Частота СВЧ поля, ν_{RF}	2.63 ГГц
Поперечное сечение сгустка, $\sigma_x \times \sigma_y$	4×2 мм ²
Поперечное сечение сгустка в точке взаимодействия с мишенью, $\sigma_x \times \sigma_y$	$\approx 15 \times 15$ мм ²
Угловая расходимость сгустка, φ	0.08 рад

Если рассмотреть один период многослойной мишени, то он представляет плоский (планарный) волновод, который является запердельным волноводом. Следуя условию запердельного волновода [25], длины волн больше чем $\lambda_{крит}^m$ экспоненциально затухают в волноводе, что позволяет производить фильтрацию излучения на выходе мишени.

Условие $\lambda_{крит}^m$ выглядит следующим образом:

$$\lambda_{крит}^m = \frac{2 \cdot a}{m}, \quad (1.38)$$

где a – зазор между пластинами, m – номер TE моды [25].

Или для частот:

$$\nu_{\text{крит}}^m = \frac{m \cdot c}{2a\sqrt{\varepsilon\mu}}, \quad (1.39)$$

где c – скорость света в вакууме, ε и μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости среды, заполняющей зазор волновода.

2.4.3 Модуляция спектра излучения последовательностью сгустков

Также необходимо учесть резонансы, возникающие из-за генерации излучения последовательностью пучков электронов (трэином). Экспериментальное и теоретическое исследование резонансов от трэина представлены в работе [24]. Из-за данных резонансов (см. соотношение (1.32)) в когерентном режиме наблюдаются выделенные спектральные линии, кратные частоте СВЧ поля (см. таблицу 2):

$$\nu_n = n \cdot \nu_{RF}, \quad (1.40)$$

где n – порядок резонанса.

Таблица 2 – Резонансы трэина

n	4	5	6	7	8	9	10
ν_n , ГГц	10.5	13.3	15.8	18.4	21.0	23.6	26.3
λ_n , мм	28.5	22.5	19.0	16.2	14.3	12.7	11.4

Длина волны 4-го резонанса трэина близка ко 2-й моде ТЕ плоского волновода $\lambda_{\text{крит}}^{m=2} = 26.5$ мм, что, предположительно, даёт в спектре излучения только спектральные линии кратные промежуточному значению между 26.5 мм и 28.5 мм.

2.4.4 Спектроскопия излучения интерферометром Мартина-Паплетта

Интерферограммы ДИ и ИВЧ измерялись интерферометром Мартина-Паплетта [26] (известный как поляризационный интерферометр Майкельсона, далее ИМП), чья схема представлена на рисунке 6, с максимально, возможной в лабораторных условиях длиной хода подвижного зеркала, равной 310 мм. Эти условия накладывают ограничения на разрешение спектральных линий [27]. На рисунке 6 красным цветом выделена эволюция поляризации излучения внутри интерферометра.

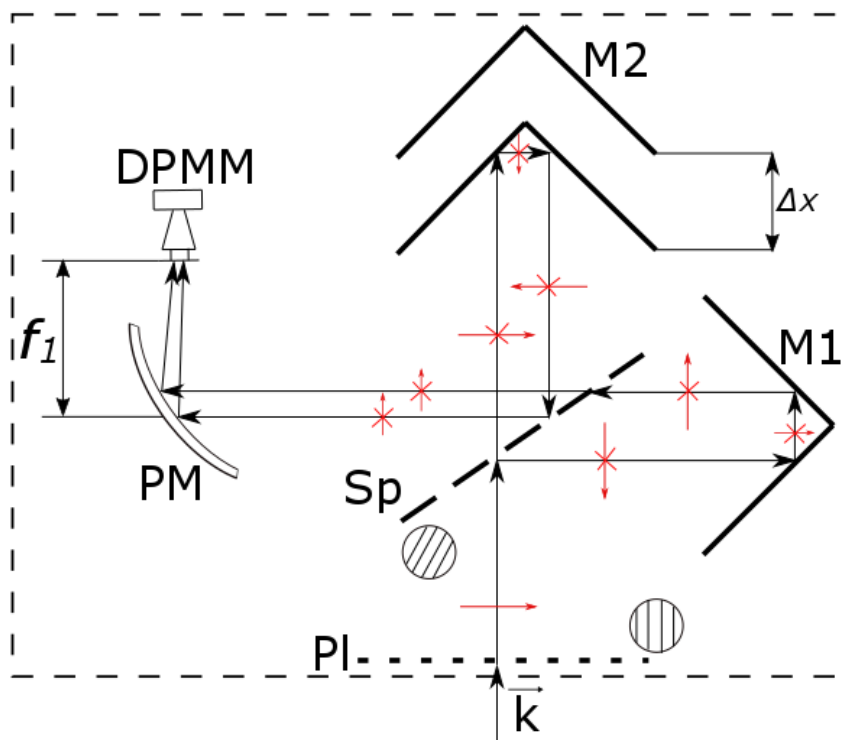


Рисунок 6 – Схема интерферометра Мартина-Паплетта: Pl – проволочный поляризатор, Sp – делитель пучка поляризационного типа, M1 – неподвижное угольковое зеркало, M2 – подвижное угольковое зеркало, PM – параболическое зеркало с фокусным расстоянием $f_1 = 95$ мм, DPMM – детектор, на основе широкоплоской антенны с низкороговым СВЧ диодом

Для неапподизированной интерферограммы, что математически определяется как бесконечная интерферограмма, домноженная на весовую функцию окна, разрешение интерферометра составляет:

$$\delta\nu = \frac{1.21 \cdot c}{2L}, \quad (1.41)$$

где $\delta\nu$ – ширина линии на полувысоте, c – скорость света в вакууме, L – максимальная разность хода подвижного зеркала.

Для случая треугольной апподизации разрешение интерферометра составляет:

$$\delta\nu = \frac{1.79 \cdot c}{2L} \quad (1.42)$$

Кроме ограничения на разрешение интерферометра, необходимо учитывать шумы детектора DPPM и конечные размеры источника излучения. Шумы детектора, а именно отношение сигнала к шуму, определяет длину прохода интерферограммы. Для ИМП, находящегося в наличии лаборатории “Фотон”, НИ ТПУ, отношение сигнала к шуму позволяет задействовать всю длину хода подвижного зеркала 310 мм. Параметры ИМП представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры ИМП

Габаритные размеры ИМП	550 × 550 мм
Размеры уголковых зеркал М1 и М2	170 × 170 мм
Диаметр зеркала РМ	210 мм
Фокусное расстояние f_1	95 мм
Размеры поляризатора Р1	210 × 210 мм
Перемещение зеркала Δx	310 мм
Точность перемещения зеркала М2	0.05 мм
Позиция равноплечия зеркал М1 и М2	34 мм

Для спектральных линий с частотами равными $\nu = 10.5, 13.3$ и 21.0 ГГц, в случае треугольной апподизации интерферограммы, максимально возможное абсолютное разрешение спектральных линии будет составлять $\Delta\nu_{int} = 0.49$ ГГц, а относительные разрешения $\Delta\nu_{int}/\nu = 4.62, 3.65$ и 2.31% соответственно.

Экспериментально измеренный спектр излучения ДИ от многослойной мишени будет зависеть не только от максимальной длины смещения подвижного зеркала и отношения сигнал-шум, а также от величины натуральной ширины линии и конечной угловой апертурой детектора. Натуральная ширина спектральной линии ДИ определяется:

$$\Delta\nu_{DR} = \frac{0.89}{k \cdot N_{eff}} \cdot \nu_k, \quad (1.43)$$

где k – порядок дифракции мишени, N_{eff} – количество эффективных периодов мишени. Коэффициент 0.89 в числителе (1.43) является следствием обратного преобразования Фурье периодической функции (периода мишени), домноженной на весовую функцию окна, определяемую конечный размер мишени.

$$N_{eff} = \frac{L_{eff}}{d}, \quad (1.44)$$

где L_{eff} – эффективная длина периодической мишени.

$$L_{eff} = \frac{\gamma\lambda}{\sin(\theta)}, \quad (1.45)$$

где λ – длина волны детектируемого излучения.

Подстановкой (1.45) и (1.44) в (1.43) выражение для вычисления ширины (в дальнейшем используется принятое обозначение FWHM – “Full Width at Half Maximum”) спектральной линии ДИ приобретает следующий вид:

$$\Delta\nu_{DR} = \frac{0.89 \cdot d}{k \cdot \gamma\lambda \cdot c} \cdot \nu_k^2 \cdot \sin(\theta) \quad (1.46)$$

В случае, когда количество сгустков электронов, взаимодействующих с многослойной мишенью, больше чем её периодов, (1.43) заменяется на вид:

$$\Delta\nu_{DR} = \frac{0.89}{k' \cdot N_b} \cdot \nu_{k'}, \quad (1.47)$$

где k' – порядок резонанса трэина, N_b – число сгустков электронов в трэине.

Конечная угловая апертура детектора накладывает следующее ограничение на экспериментальное определение FWHM спектральной линии:

$$\Delta\lambda_{apr} = \frac{d \cdot \sin(\alpha + \theta + \eta)}{k \cdot \cos(\alpha)} \cdot \Delta\eta, \quad (1.48)$$

где k – порядок дифракции многослойной мишени, $\Delta\eta$ – угловая апертура детектора.

Ограничение угловой апертуры (1.48) в частотах:

$$\Delta\nu_{apr} = \frac{d \cdot \sin(\alpha + \theta + \eta)}{k \cdot \cos(\alpha) \cdot c} \cdot \nu_k^2 \cdot \Delta\eta, \quad (1.49)$$

где ν_k – частота k порядка измеряемой спектральной линии.

Экспериментально определяемая FWHM спектральных линий в предположении, что $\Delta\nu_{DR}$ и $\Delta\nu_{int}$ (разрешение, определяемое максимальной длиной хода подвижного зеркала интерферометра – см. формулы 1.41 и 1.42) могут аппроксимироваться распределением Гаусса, составляет:

$$\Delta\nu_k = \sqrt{\Delta\nu_{DR}^2 + \Delta\nu_{apr}^2 + \Delta\nu_{int}^2} \quad (1.50)$$

Для экспериментов на микротроне НИ ТПУ реализуется случай (1.47): $k' = 4$, $N_b = 10^4$ пучков, что даёт натуральную ширину линии ДИ, равную $\Delta\nu_{DR} = 0.19 \cdot 10^{-3}$ ГГц, что позволяет рассмотреть генерируемый спектр как набор монолиний. Данное утверждение приводит к оправданности применения формул 1.47 и 1.49 для уширения монолинии влиянием конечных размеров интерферограммы и угловой апертуры детектора. Столь узкая ширина линии позволяет пренебречь первым членом в формуле (1.50):

$$\Delta v_k = \sqrt{\Delta v_{apr}^2 + \Delta v_{int}^2} \quad (1.51)$$

Для первого порядка дифракции многослойной мишени $k = 1$, порядка резонанса на трэине $k' = 4$, угловой апертуры детектора $\Delta\eta = 4^\circ$ и параметров мишени, указанных в разделе 2.1, углы наблюдения для стендовых измерений и измерений на выведенном пучке микротрона представлены в таблице 4.

2.5 Алгоритм обработки экспериментальных данных

В эксперименте снимаются два типа зависимостей: 1 – ориентационная зависимость, 2 – интерферограммы спектра излучения. Для корректной обработки зависимостей необходимо применять правильные алгоритмы обработки данных. Для угловых зависимостей была применена следующая последовательность:

1. импорт данных из файла;
2. усреднение сигнала детектора излучения и датчика тока пучка по количеству снимаемых значений в одной позиции поворотного устройства мишеней поляризационного излучения;
3. вычисление среднеквадратичного отклонения сигнала от среднего значения сигнала;
4. вычет фона из усредненного сигнала детектора и датчика тока;
5. нормирование сигнала детектора на сигнал датчика тока, для нивелирования флуктуаций тока пучка электронов.

Действия 1-5 для угловых зависимостей также реализуются в алгоритме обработки интерферограмм спектра излучения, но добавляются дополнительные шаги в последовательности:

1. аппроксимация усреднённого сигнала детектора линейной зависимостью;
2. вычет из усреднённого сигнала аппроксимационной зависимости;
3. симметризация интерферограммы относительноно позиции равноплечия зеркал;

4. апподизация сигнала треугольной зависимостью;
5. применение алгоритма дискретного преобразования Фурье (ДПФ) [28];
6. вычисление ошибки ДПФ;
7. аппроксимация спектральных пиков гауссианом.

Два вышеуказанных алгоритма реализовывались на объектно-ориентированном языке программирования Python 3.x. Выбор был сделан в пользу Python 3.x из-за его выразительности, большого наличия модулей (numpy, scipy, matplotlib и т.д). Важной особенностью написанного программного кода является возможность автоматизированного выбора типа обрабатываемой зависимости. Весь исходный программный код представлен в приложении А.

В дальнейшем планируется реализация графического интерфейса с использованием расширения PyQt5.

3 Численное моделирование эксперимента

3.1 Измерения на стендовом ГГц излучателе

В первую очередь производилось численное моделирование в программном пакете CST Studio Suite (Computer Simulation Technology Studio Suite) для геометрии измерений на стендовом ГГц-м излучателях следующем порядке:

1. моделировалась геометрия стендовых измерений: пучок излучения из ГГц излучателя, стоящего в фокусе параболического зеркала, отражался от параболического зеркала. Потом излучение взаимодействовало с мишенью, край которой устанавливался на расстоянии 300 мм от центра параболического зеркала. Излучение детектировалось на расстоянии 1 метр от центра выходной грани многослойной мишени, что позволяло детектировать в дальней волновой зоне (“farfield” в англоязычной литературе).
2. задавался спектр стендового излучателя (см. рисунок 7);
3. смоделированный спектр обладающий угловой расходимостью падал на параболическое зеркало;
4. вычислялась угловая зависимость излучения после взаимодействия с параболическим зеркалом;
5. далее параллельный пучок, представляющий из себя плоскую волну, взаимодействовал с многослойной мишенью при разных углах ориентации мишени относительно волнового вектора падающего излучения;
6. вычислялось угловое распределение излучения после взаимодействия с мишенью;
7. данные из CST Studio Suite импортировались в Python 3.x и обрабатывались с использованием модулей numpy, scipy и matplotlib (программный код представлен в приложении А).

Спектр излучения являлся распределением Гаусса с математическим ожиданием $\mu = 10.51$ ГГц и среднеквадратичным отклонением $\sigma = 0.22$ ГГц.

Динамика угловых зависимостей для интересующих углов ориентации мишени $\theta = 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$ представлена на рисунке 8. При ориентации мишени относительно направления падения излучения интенсивность пика дифрагированного излучения возрастает, что свидетельствует о наличии эффективной площади захвата излучения в многослойную призму. Также мишень чувствительна к поляризации падающего излучения, что обусловлено волноводной структурой мишени. Захватывается в мишень и распространяется вдоль мишени только плоская, горизонтально поляризованная волна. Также следует отметить, что результаты моделирования выполнены для дальней волновой зоны [29].

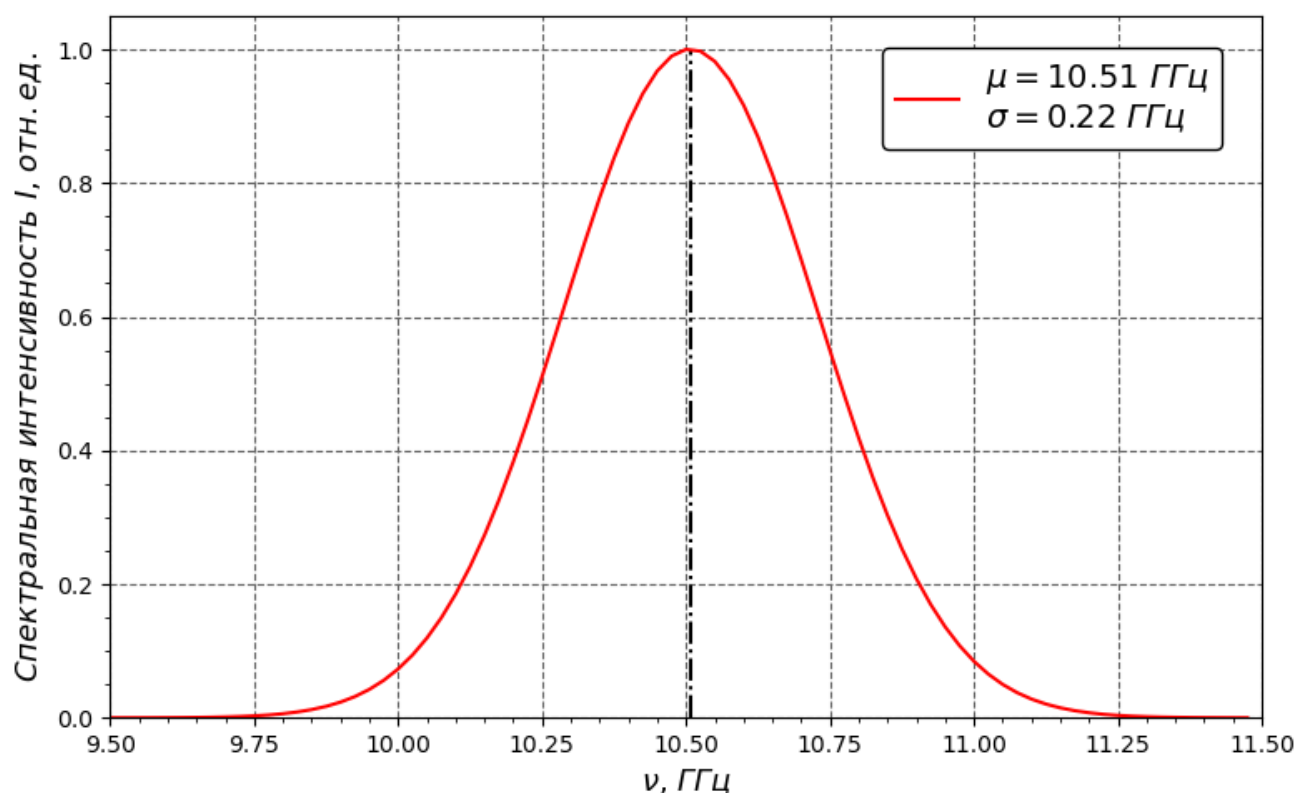


Рисунок 7 – Смоделированный спектр стенового излучателя

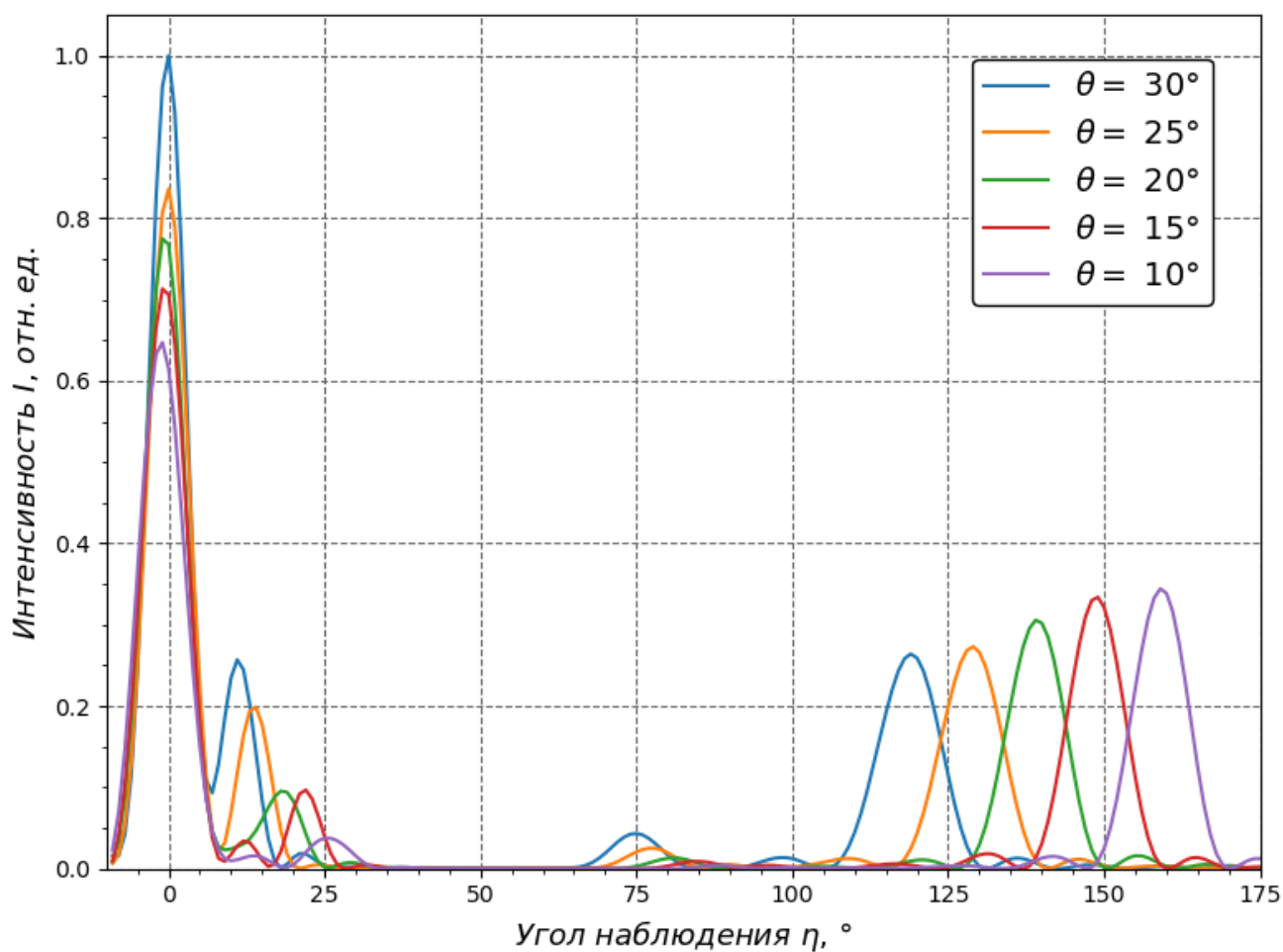
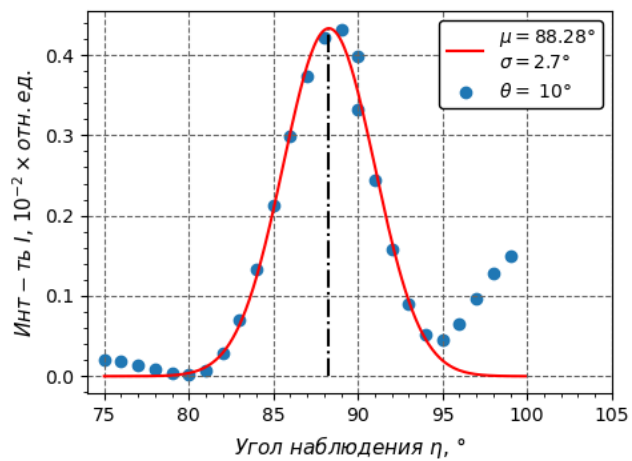


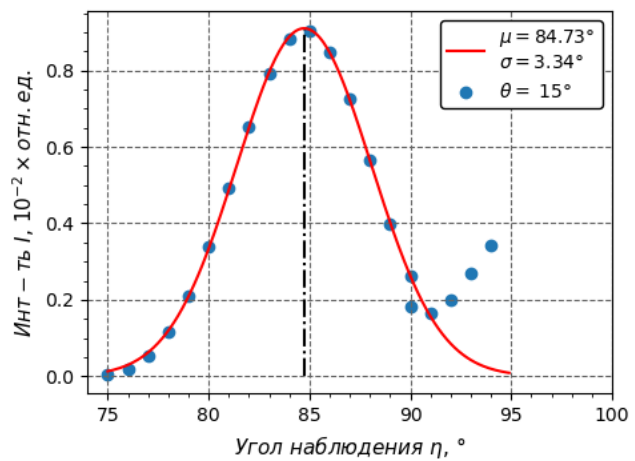
Рисунок 8 – Динамика угловых зависимостей

Пики, находящиеся под углом наблюдения больше 100° , являются отражённым излучением от первого слоя. Одна часть излучения проходит рядом с мишенью, не взаимодействуя с ней, а другая испытывает дифракцию на последнем слое и возникает пик в пределах от 10° до 25° .

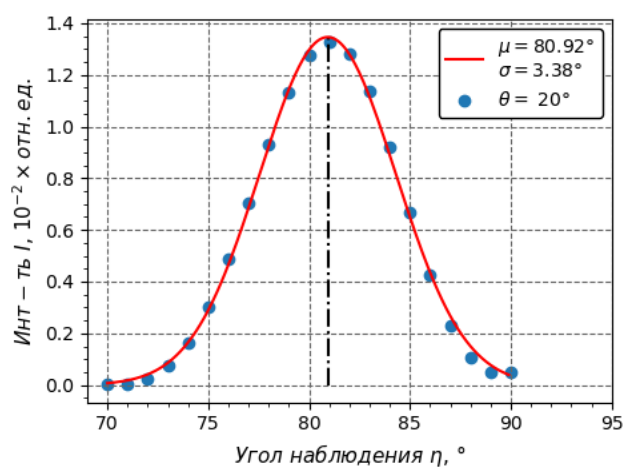
Аппроксимированные пики излучения испытывавшие дифракцию на всех слоях мишени для углов наблюдения от 75° до 90° (см. рисунок 8) представлены на рисунке 9.



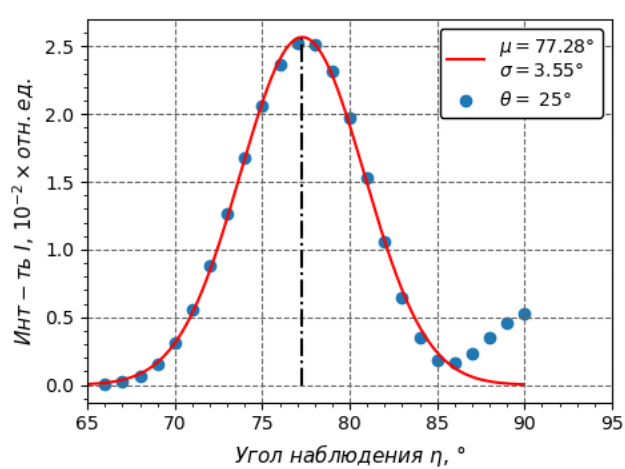
(а)



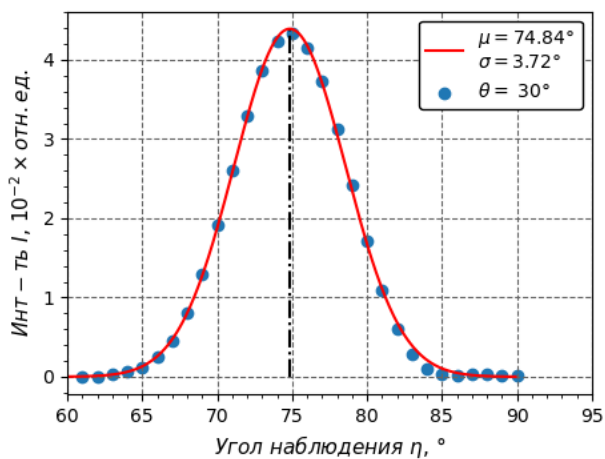
(б)



(в)



(г)



(д)

Рисунок 9 – Пики продифрагированного излучения: (а) $\theta = 10^\circ$, (б) $\theta = 15^\circ$,
(в) $\theta = 20^\circ$, (г) $\theta = 25^\circ$, (д) $\theta = 30^\circ$

Видно хорошее согласие аппроксимации пиков численного моделирования распределением Гаусса в пределах ошибки выполненных расчётов в программном пакете CST Studio Suite.

Таблица 4 – Сравнение результатов численного моделирования и расчёта по выражению (1.13б)

$\theta, ^\circ$	$\eta_{max}, ^\circ$	$\sigma, ^\circ$	$I, 10^{-2}$ отн. ед.	$\eta_{теор}(\vartheta = c), ^\circ$
10	88.70	2.70	0.4	84.12
15	84.73	3.34	0.8	77.92
20	80.92	3.38	1.2	71.22
25	77.28	3.55	2.5	63.97
30	74.84	3.72	4.0	56.12

Теоретически рассчитанный угол наблюдения по выражению (1.13б) даёт заниженные значения позиции пика по сравнению с численным моделированием, что объясняется влиянием волноводной структурой многослойной мишени [25], не учитывающейся в дисперсионном соотношении (1.13а).

3.2 Моделирование излучения на выведенном пучке микротрона

Для параметров, представленных в таблице 1, производилось моделирование по следующему алгоритму:

1. создавалась 3D модель многослойной мишени;
2. определялись параметры выведенного пучка микротрона;
3. определялись параметры наблюдения угловой зависимости излучения;
4. определялась длина трезина пучков электронов;
5. производилась пост-обработка данных моделирования;
6. менялся угол ориентации мишени;
7. пункты 1-6 повторялись для углов ориентации мишени: $\theta = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$.

Как результат опорного моделирования, выбиралась линия 4-го резонанса по трэину.

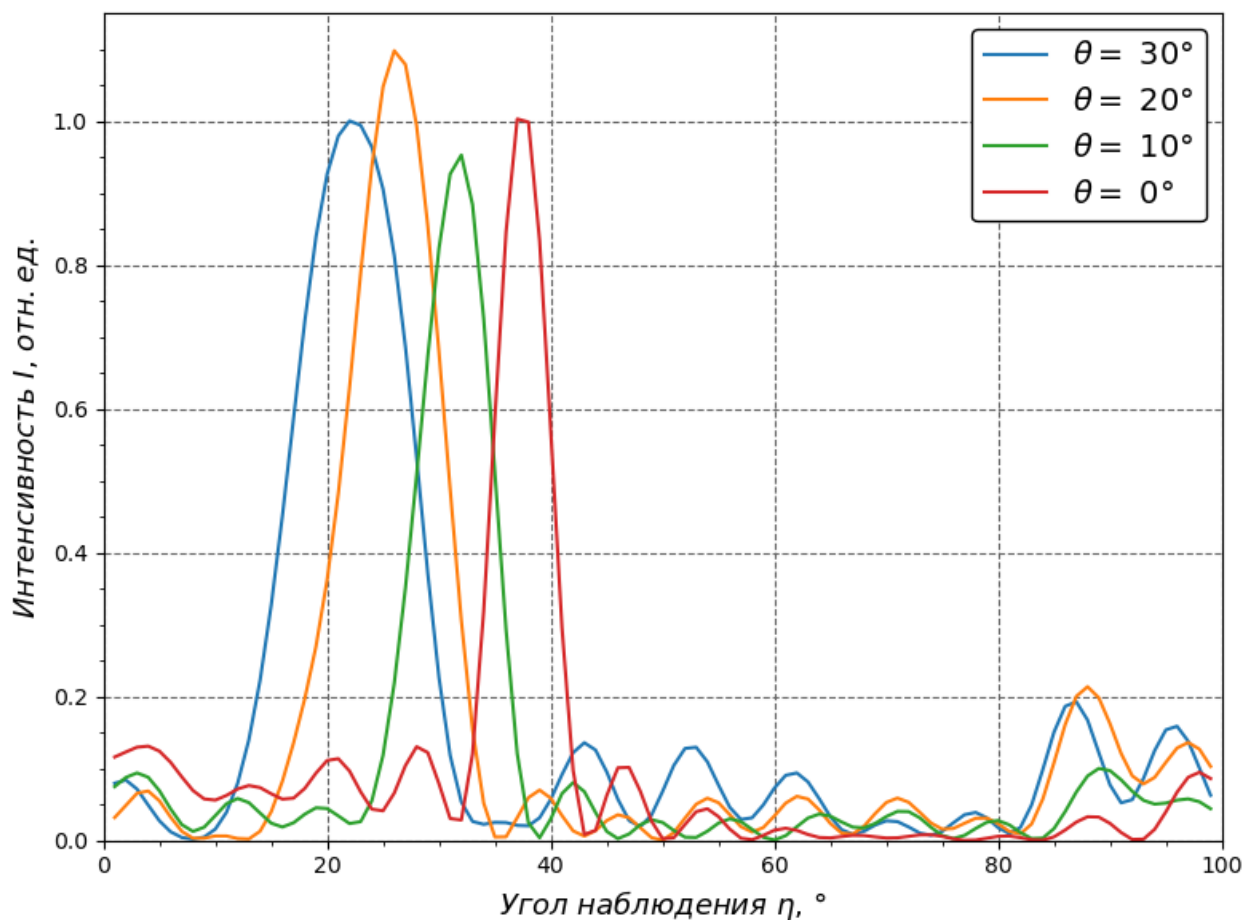
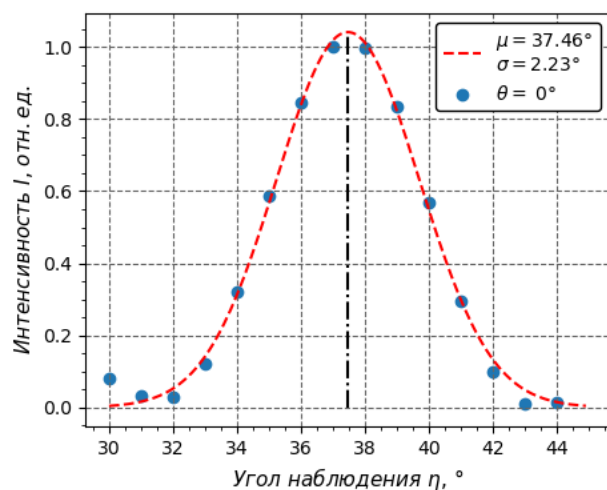
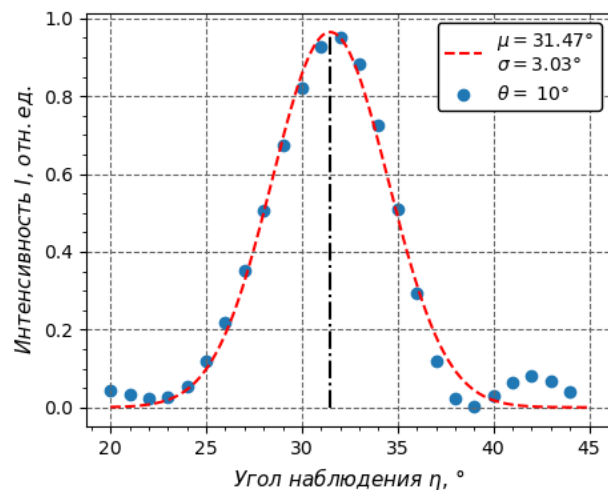


Рисунок 10 – Динамика угловых распределений ДИ от многослойной призмы в дальней волновой зоне

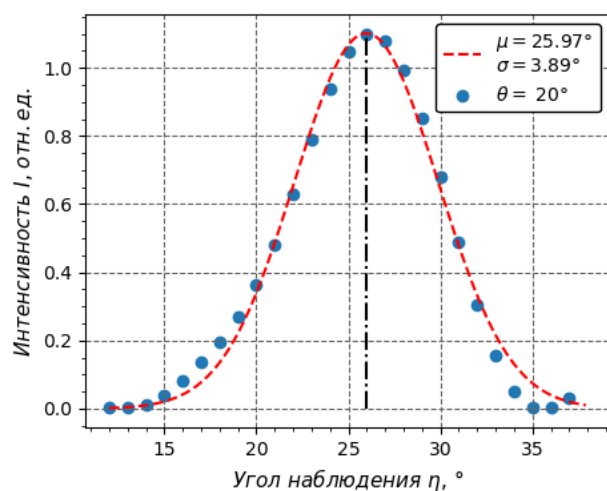
Динамика пиков углового распределения ДИ от многослойной призмы на выведенном пучке электронов совпадает со стендовыми измерениями – при ориентации мишени относительно направления движения пучка электронов, пик излучения продифрагированного на всех периодах многослойной призмы, смещается в меньшие углы и ширина пика увеличивается с увеличением угла ориентации мишени. Аппроксимированные пики угловой зависимости показаны на рисунке 11, а результирующие параметры аппроксимации пиков представлены в таблице 5.



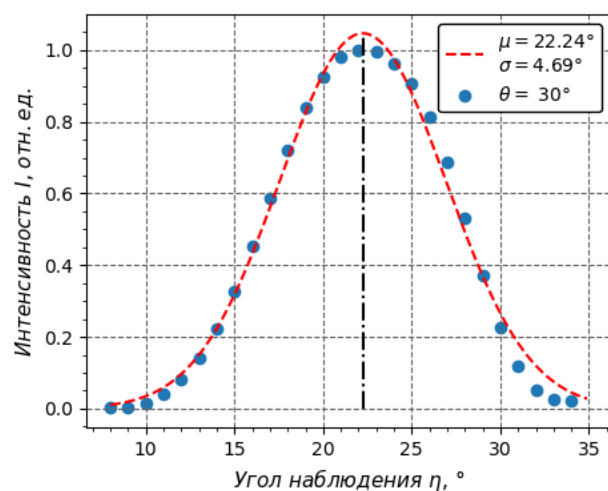
(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 11 – Аппроксимированные пики угловых распределений численного моделирования: (а) $\theta = 0^\circ$, (б) $\theta = 10^\circ$, (в) $\theta = 20^\circ$, (г) $\theta = 30^\circ$

Таблица 5 – Результаты численного моделирования угловых зависимостей

$\theta, ^\circ$	$\eta_{max}, ^\circ$	$\sigma, ^\circ$
0	37.46	2.23
10	31.47	3.03
20	25.97	3.89
30	22.24	4.69

4 Экспериментальная часть

4.1 Измерение угловых зависимостей на стендовом ГГц-м излучателе

Измерение угловых зависимостей проводилось с использованием стендового ГГц излучателя, чьим активным элементом является диод Ганна (спектр стендового излучателя представлен на рисунке 12). Измерение спектра было выполнено автором в бакалаврской диссертации [22]. Основная частота излучателя совпадает с 4 порядком резонанса на трэине и близка к 2-й ТЕ моде плоского волновода, что позволяет проверить дисперсионное соотношение (1.136) (см. подраздел 2.1).

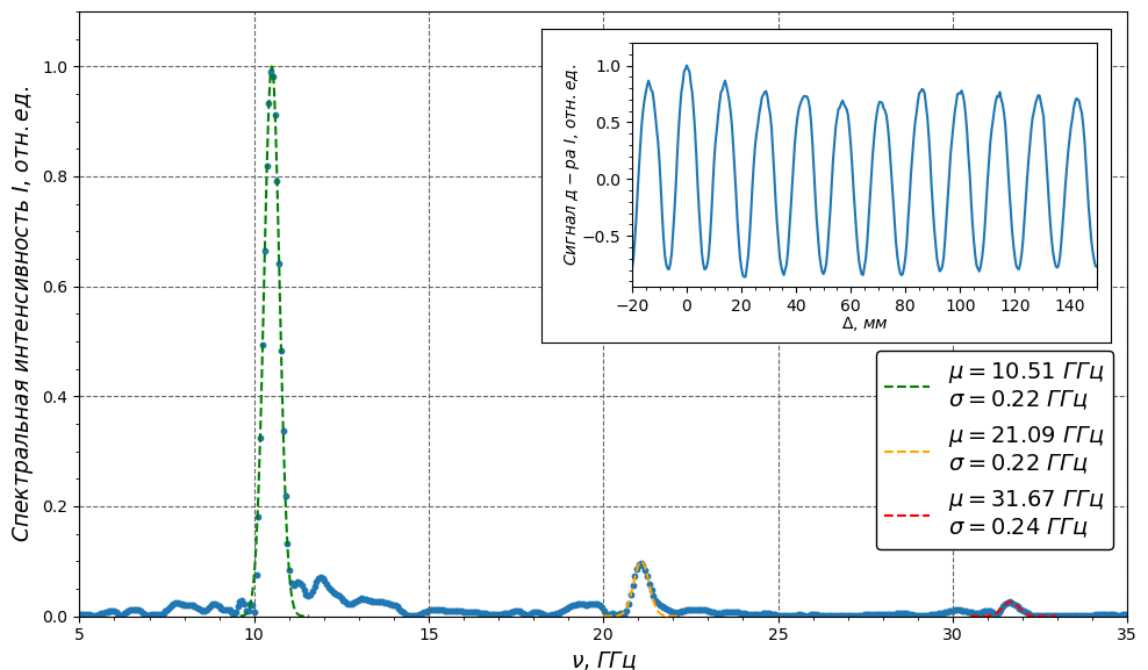


Рисунок 12 – Экспериментально определённый спектр стендового ГГц излучателя

Из таблицы 6 видно, что стендовый ГГц источник является квазимонохроматическим. Отклонение экспериментально определённого спектра с расчётом по формуле (1.42) показывает согласие в пределах 7% для 1 и 2 порядков излучателя, когда отклонение для 3 порядка превышает 10 %, что обусловлено малым превышением интенсивности 3 порядка над уровнем шума и не позволяет его идентифицировать.

Величина отклонения экспериментально определённой степени монохроматичности спектральных линий стендового излучателя (см. таблицу 6) вычислялась следующим образом:

$$\Delta(\delta\nu_{\text{эксп}}/\nu) = \frac{|\delta\nu_{\text{эксп}}/\nu - \delta\nu_{\text{теор}}/\nu|}{\delta\nu_{\text{теор}}/\nu} \cdot 100\%, \quad (4.1)$$

где $\delta\nu_{\text{эксп}}/\nu$ и $\delta\nu_{\text{теор}}/\nu$ – экспериментально определённых и теоретически рассчитанных степени монохроматичности спектральных линий.

Таблица 6 – Сравнение результатов измерений и расчёта по формуле (1.42)

ν , ГГц	$\delta\nu_{\text{теор}}$, ГГц	$\delta\nu_{\text{эксп}}$, ГГц	$\delta\nu_{\text{теор}}/\nu$, %	$\delta\nu_{\text{эксп}}/\nu$, %	$\Delta(\delta\nu_{\text{эксп}}/\nu)$, %
10.51	0.49	0.52	4.66	4.95	6.22
21.09	0.49	0.52	2.32	2.47	6.47
31.67	0.49	0.56	1.55	-	-

Для детектирования угловых зависимостей использовался параболический телескоп, состоящий из поворотного механизма, направляющей штанги, параболического зеркала с фокусным расстоянием $f = 145$ мм. И размещённым в фокусе параболического зеркала широкополосного детектора DPMM [29] с установленным на детекторе заградительным волноводом для подавления низкочастотных (больших длин волн) шумов. Ширина полосы детектора DPMM лежит в диапазоне длин волн $\lambda = 5 \div 50$ мм.

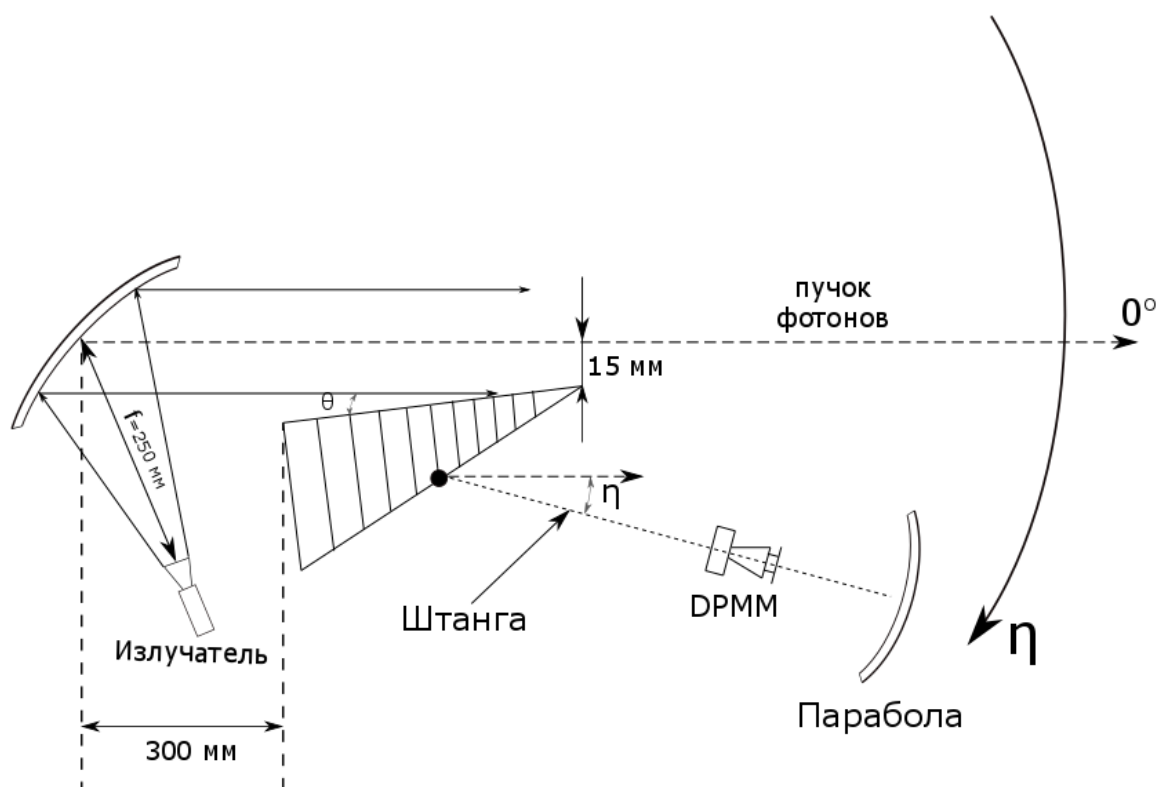


Рисунок 13 – Схема измерения угловых зависимостей от многослойной мишени на стенде

Схема измерений выбиралась из соображений геометрии проведения эксперимента на микротроне НИ ТПУ: излучатель располагался в фокусе параболического зеркала с фокусным расстоянием $f_1 = 250$ мм, что позволяло получить параллельный пучок излучения. Излучение падало на многослойную призму и взаимодействовало с ней. Параболическим телескопом измерялась угловая зависимость.

Угловые зависимости снимались для четырёх углов ориентации мишени относительно направления падающего излучения: $\theta = 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ и 30° . Ось вращения находилась в точке a – дальнего острого угла мишени.

Пучок реальных фотонов, спектральный состав которого показан на рисунке 12, генерируется стендовым ГГц-м излучателем на основе диода Ганна, стоящим в фокусе параболического зеркала, падал под углом на параболическое зеркало с фокусным расстоянием $f_1 = 250$ мм. Пучок фотонов, отразившись от параболического зеркала, является квазипараллельным. Он взаимодействует с многослойной мишенью и испытывает дифракцию, захватываясь периодами мишени, оставшаяся часть пучка продолжает распространяться в первоначальном направлении и испытывает дифракцию на последнем слое мишени, так как длина волны $\lambda = 28.5$ мм ($\nu = 10.51$ ГГц) сопоставима по порядку величины с прицельным параметром $h = 15$ мм. Излучение, захваченное периодами мишени, фильтруется, распространяясь вдоль промежутка между двумя слоями (см. подраздел 2.4.2).

На выходе из промежутка между двумя слоями профильтрованное излучение от последовательности периодов интерферирует между собой и формирует угловое распределение, которое измеряется параболическим телескопом.

Процедура съёма данных выглядела следующим образом: в первую очередь снималась ориентационная зависимость излучения без мишени, чтобы определить размеры источника излучения и получить привязку к началу координат в системе измерений угловой зависимости. Далее пик аппроксимировался гауссианом, полученное математическое ожидание являлось началом отсчёта и зависимость преобразовывалась относительно данного начала (см. рисунок 14). Для определения вклада излучения, рассеянного от первого слоя мишени и элементов стенда – для этого отдельно снимались зависимости с мишенью, состоящей из одного слоя (см. рисунок 15).

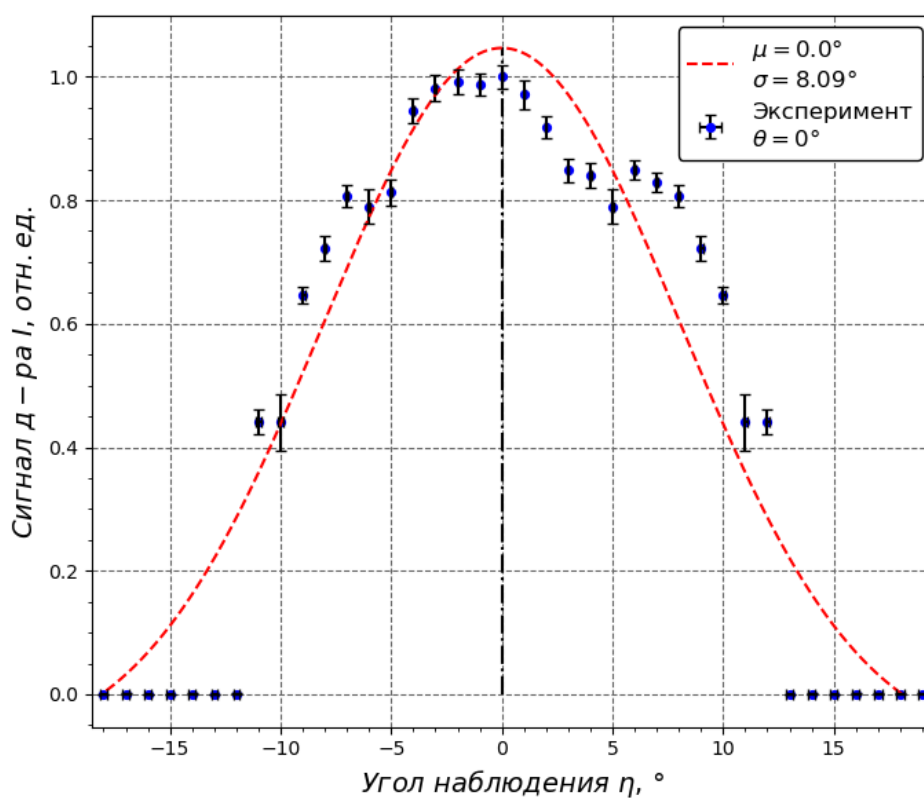


Рисунок 14 –Угловой размер параллельного пучка фотонов после отражения от параболического зеркала

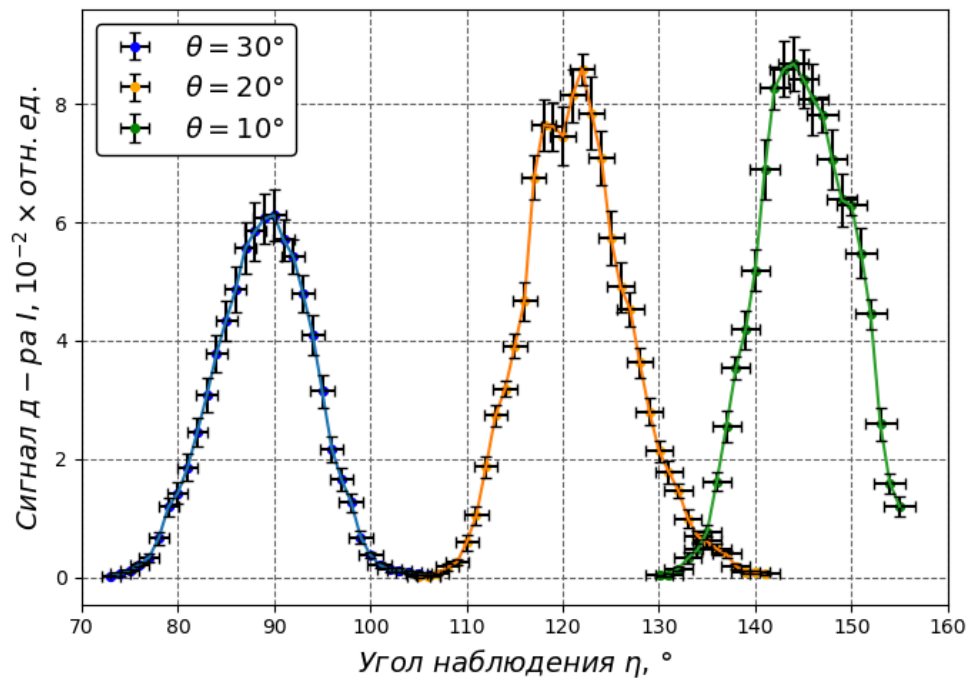


Рисунок 15 – Измеренные угловые зависимости вклада рассеянного излучения от первого слоя мишени

Динамика угловых зависимостей от угла ориентации многослойной призмы представлена на рисунке 16.

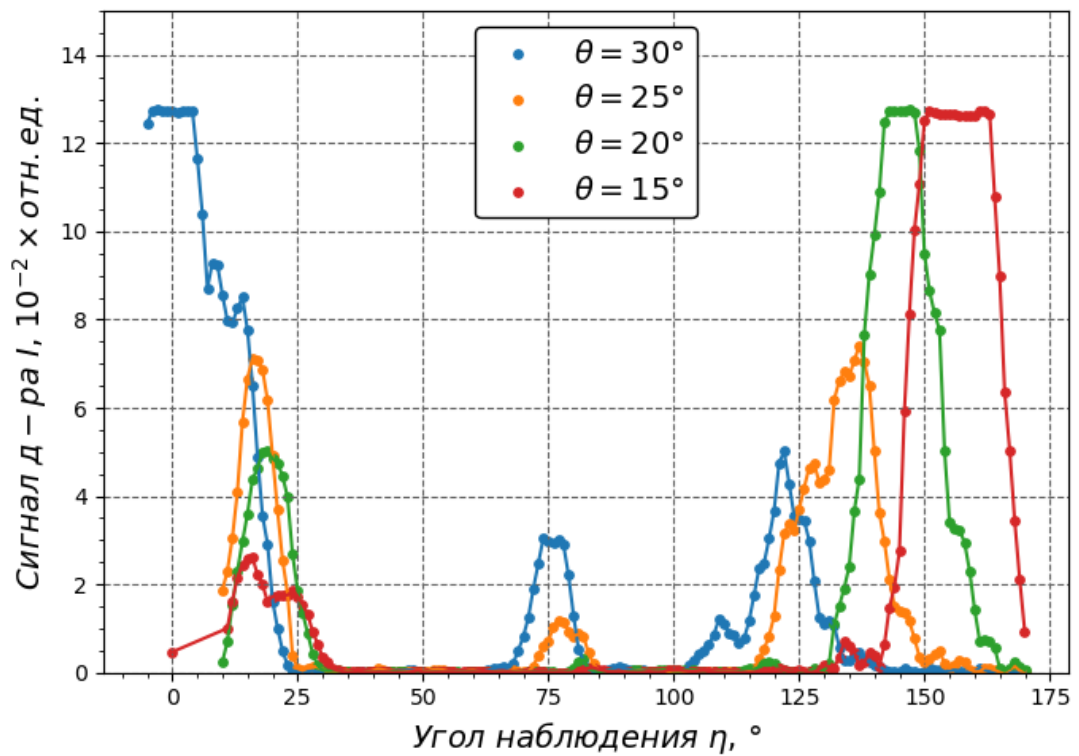


Рисунок 16 – Динамика угловых распределений

Форма падающего излучения носит изменённый характер из-за дифрагированного излучения от края последней пластины.

Аппроксимация пиков 1-го порядка дифракции, изображённые на измеренных угловых распределениях (см. рисунок 16) в пределах углов от 60° до 90° показаны на рисунке 17.

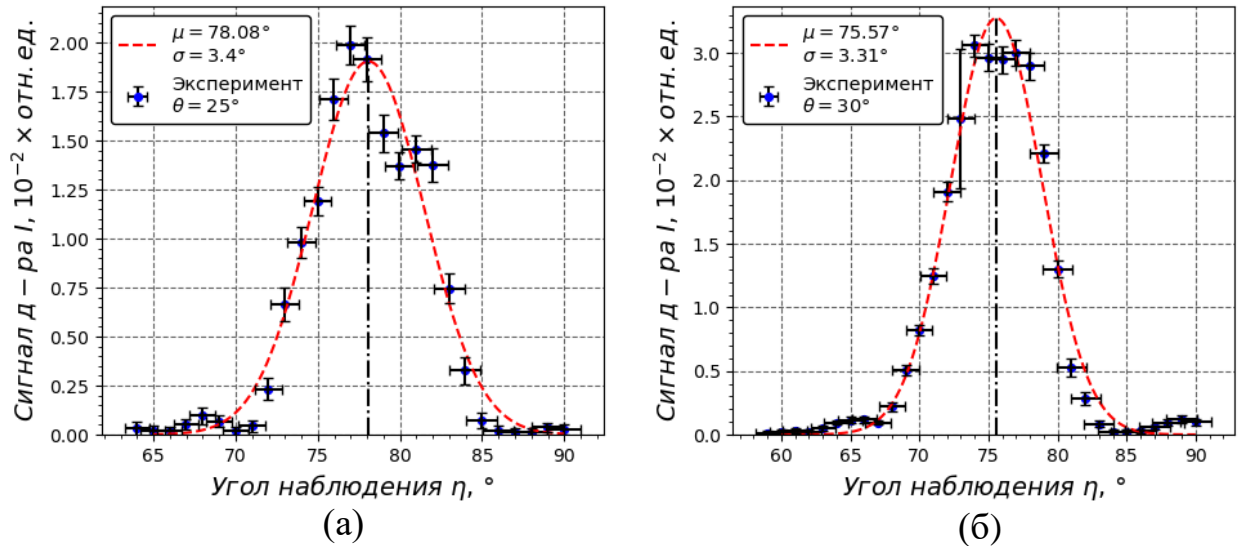


Рисунок 17 – Пик 1-го порядка дифракции излучения на многослойной мишени: (а) $\theta = 25^\circ$, (б) $\theta = 30^\circ$

Аппроксимированные распределением Гаусса пики углового распределения согласуются в пределах ошибки измерения. Для угла поворота $\theta = 15^\circ, 20^\circ$ интенсивность пика не превышает сигнала шума, поэтому идентифицировать данный пик нельзя.

Причина отсутствия пиков объясняется эффективностью захвата излучения в промежутки между слоями мишени, а именно эффективной площадью мишени относительно направления распространения пучка фотонов стендового излучателя.

Сравнение результатов численного моделирования и проведённых измерений угловых распределений показаны на рисунке 18.

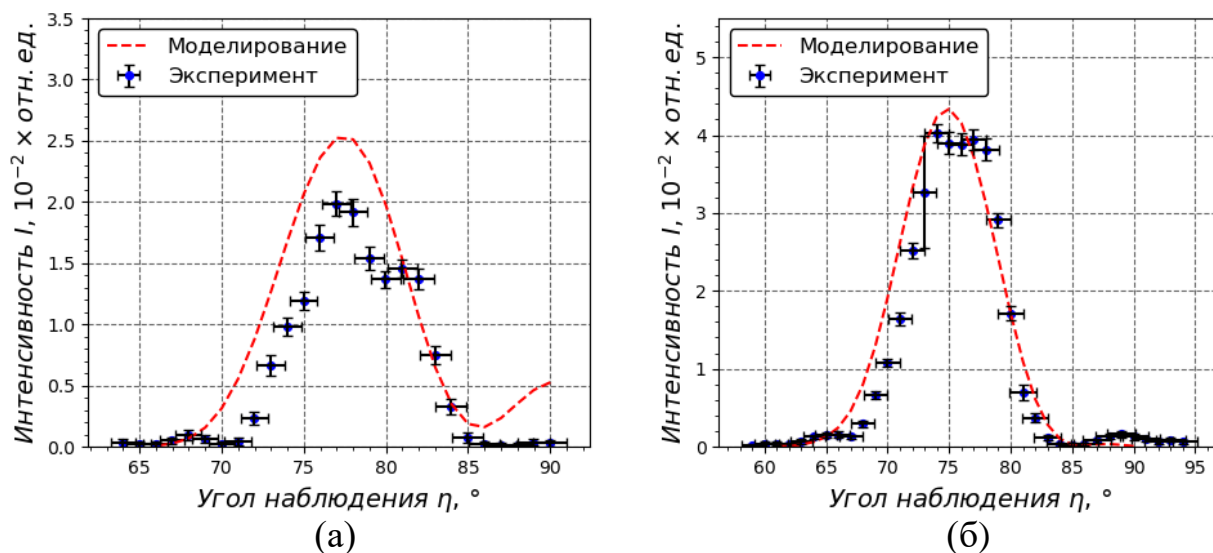


Рисунок 18 – Сравнение стендовых измерений и численного моделирования: (а) $\theta = 25^\circ$, (б) $\theta = 30^\circ$

Видно, что для угла ориентации $\theta = 30^\circ$ измерения сходятся с численным моделированием (см. рисунок 18.в), в то время как для угла ориентации $\theta = 25^\circ$ результат моделирования выше, чем измеренная зависимость (см. рисунок 18.а и рисунок 18.б). Полное сравнение результатов моделирования, расчёта по дисперсионному соотношению и измерений представлены в таблице 7. На рисунке 19 изображены сравнения моделирования и измерений зависимостей угла наблюдения от угла ориентации (см. рисунок 19а), и интенсивности максимума пика от угла ориентации мишени (см. рисунок 19в).

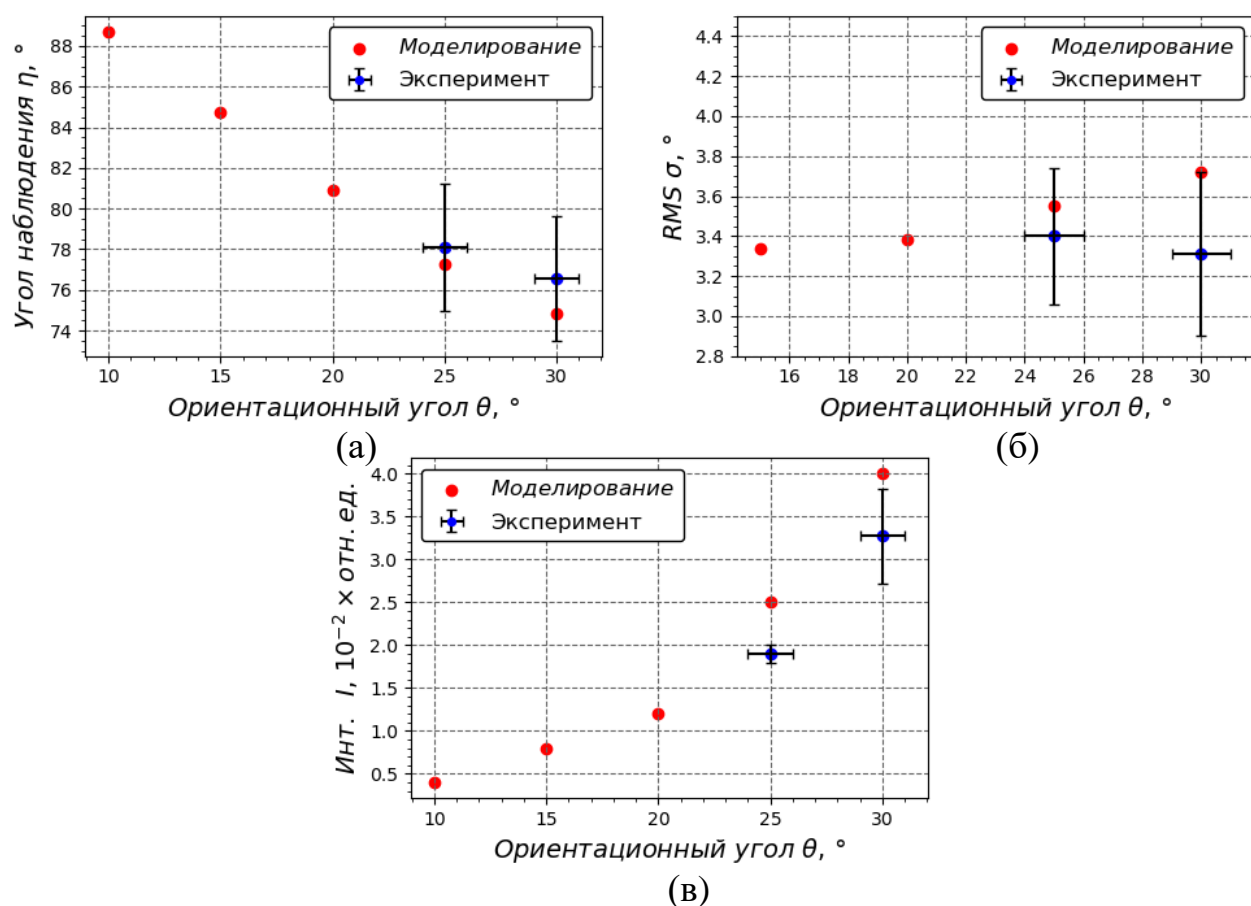


Рисунок 19 – Сравнение моделирования и эксперимента: (а) – угол наблюдения от угла ориентации, (б) – среднеквадратичного отклонения (RMS) от угла ориентации, (в) – интенсивности пика от угла ориентации

Таблица 7 – Сравнение результатов расчёта по формуле (1.13а), численного моделирования и измерений на стенде

$\theta, ^\circ$	$\eta_{\text{теор}}, ^\circ$	$\eta_{\text{эксп}}, ^\circ$	$\sigma_{\text{экс}}, ^\circ$	$\eta_{\text{мод}}, ^\circ$	$\sigma_{\text{мод}}, ^\circ$
15	77.92	—	—	84.73	3.34
20	71.22	—	—	80.92	3.38
25	63.97	78.08°	3.40	77.28	3.55
30	56.12	76.57°	3.31	74.84	3.72

Результаты моделирования и эксперимента показывают согласие в пределах ошибки измерения для ширин пиков углового распределения (см. рисунок 19а) и положений пиков (см. рисунок 19б), но моделирование интенсивности излучения в максимуме пика углового распределения не сходится в пределах ошибки измерения (см. рисунок 19в), что требует дальнейшего исследования.

4.2 Постановка эксперимента на микротроне

4.2.1 Общая схема постановки измерений

Пучок электронов ускоренный в микротроне выводился из патрубка в атмосферу через бериллиевое (Be) окошко толщиной 50 мкм. Заряд трэина измерялся индукционным датчиком тока (пояс Роговского). Край мишени располагался на расстоянии 300 мм. От выводного патрубка с импакт-параметром (кратчайшим расстоянием до направления движения пучка) 15 мм. Ось вращения мишени располагалась на дальнем конце мишени в точке *a*. Ось вращения параболического телескопа располагалась по центру выходных граней мишеней.

После измерения угловых зависимостей приступали к измерению интерферограмм с использованием интерферометра Мартина-Паплетта (далее ИМП) [26] спектра излучения под углами, ярко выраженными на измеренных угловых зависимостях.

4.2.2 Измерения спектрально-угловых характеристик ИВЧ

Измерения проводились в геометрии, представленной на рисунке 21, для углов ориентации тефлоновой призмы, лежащих в пределе от 0° до 21° . Измерения прозводились с шагом 3° угла ориентации тефлоновой призмы.

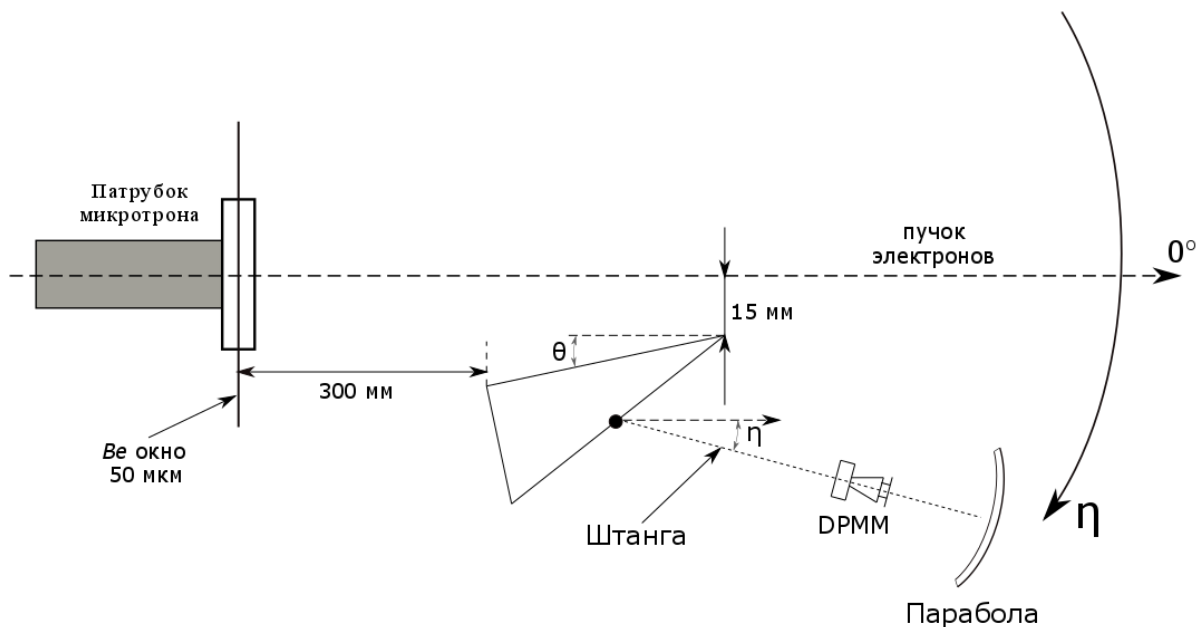


Рисунок 20 – Схема измерения угловых зависимостей ИВЧ от тефлоновой призмы

Схема измерений угловых распределений ИВЧ от тефлоновой призмы идентична со схемой, представленной в подразделе 4.1, за исключением того, что движение параболического телескопа происходило против часовой стрелки, то есть штанга (см. рисунок 20) подводилась к траектории пучка электронов, из-за чего происходило накопление дополнительной ошибки измерения позиции и FWHM пика углового распределения в 5%.

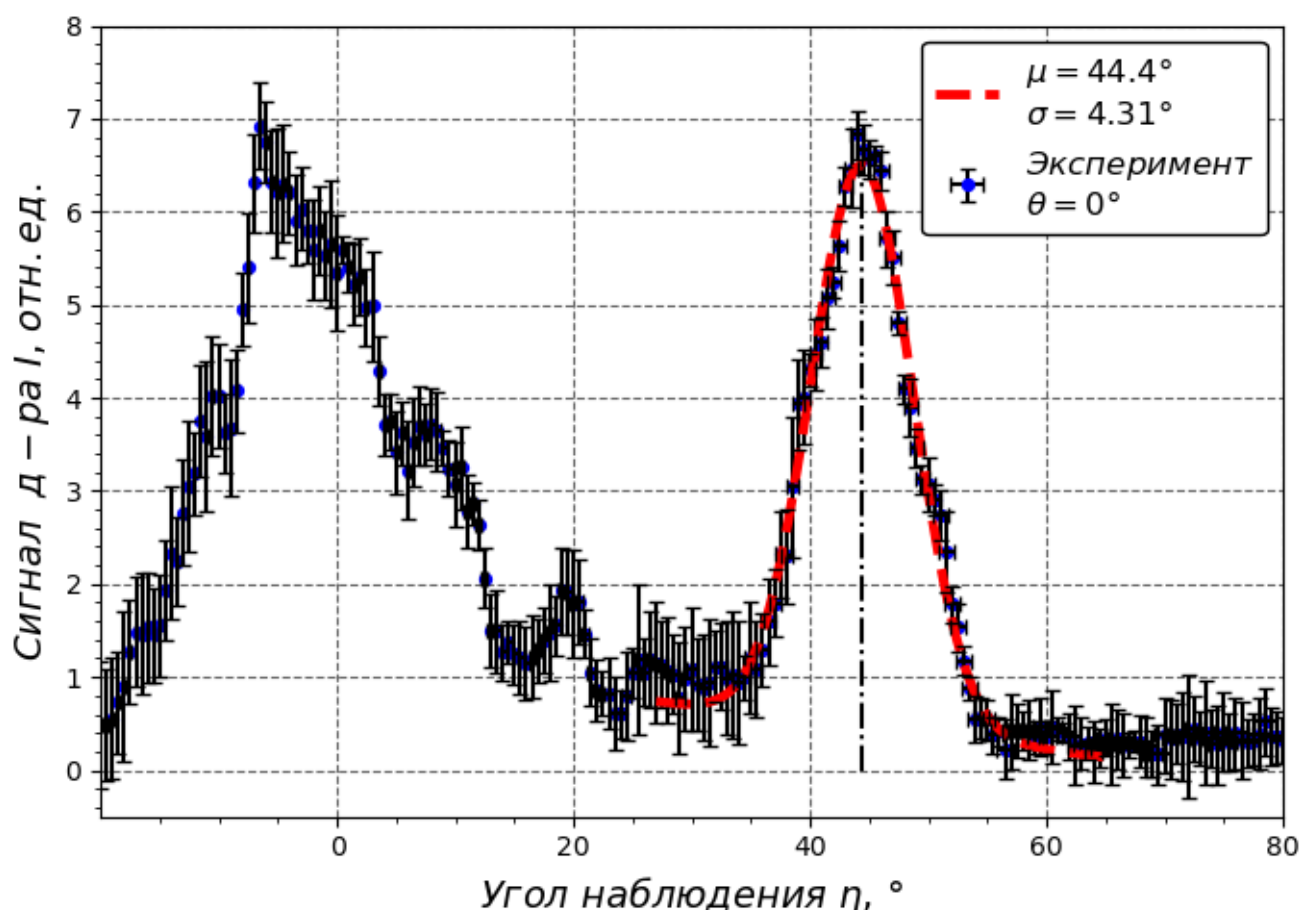
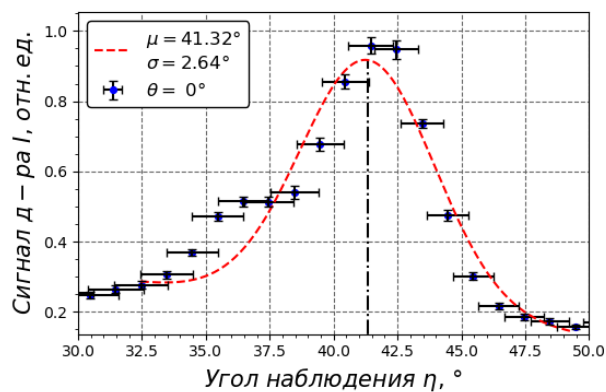


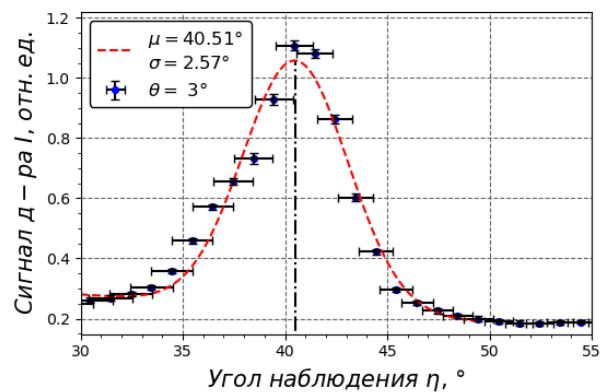
Рисунок 21 – Угловая зависимость ИВЧ от тефлоновой призмы, измеряемая на выведенном пучке микротрона

На рисунке 21 ярко выражен пик ИВЧ, наблюдаемый под углом $\eta = 44.4^\circ$, пик ПИ от параболического зеркала, установленного на штанге телескопа (см. рисунок 20), по которому производилась привязка к началу отсчёта позиции центра сгустка электронов. Пик ДИ от передней грани тефлоновой призмы в экспериментальном сеансе слился с пиком ПИ, что не позволило его детектировать.

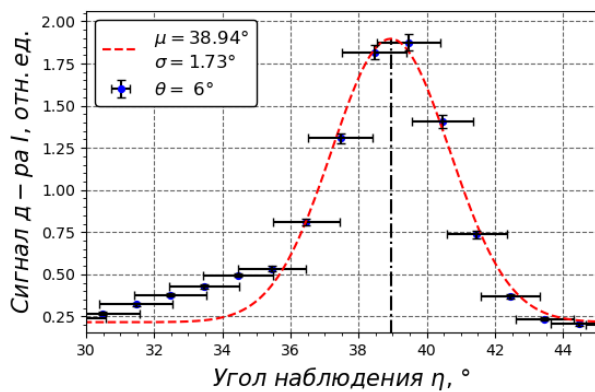
На рисунке 22 отображены аппроксимации пиков ИВЧ для всего диапазона изменения угла ориентации тефлоновой призмы. Результаты аппроксимации лежат в пределах ошибки измерения угловых распределений.



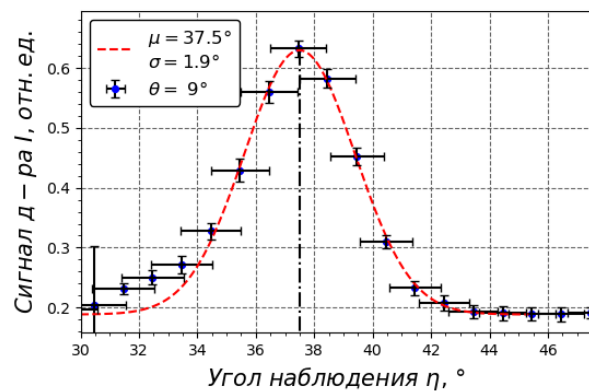
(а)



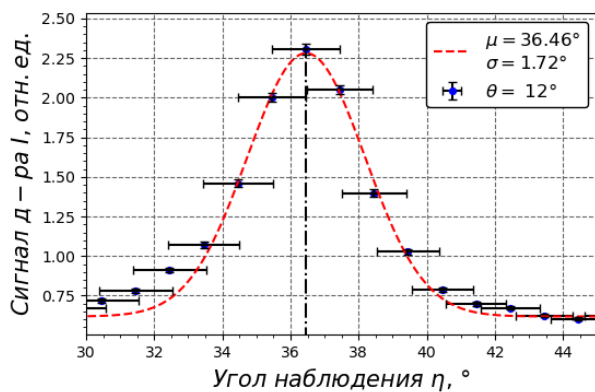
(б)



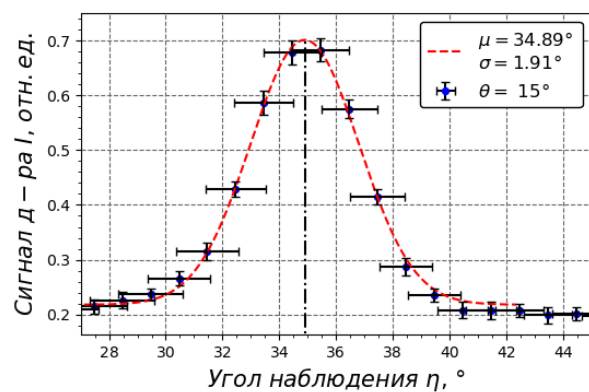
(в)



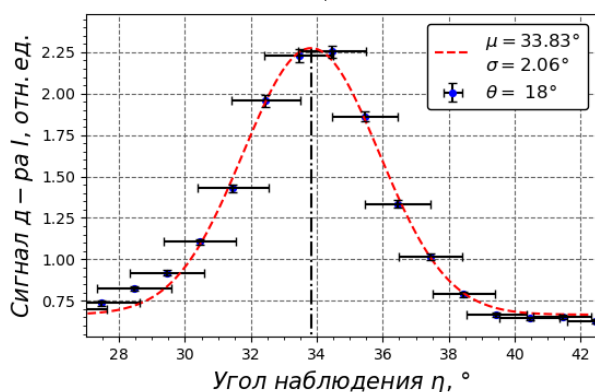
(г)



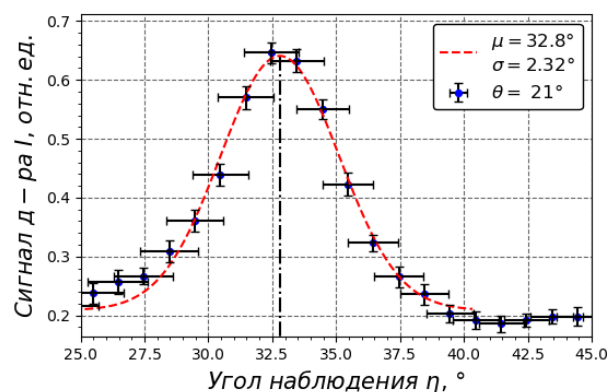
(д)



(е)



(ё)



(ж)

Рисунок 22 – Угловые зависимости ИВЧ от тефлоновой призмы

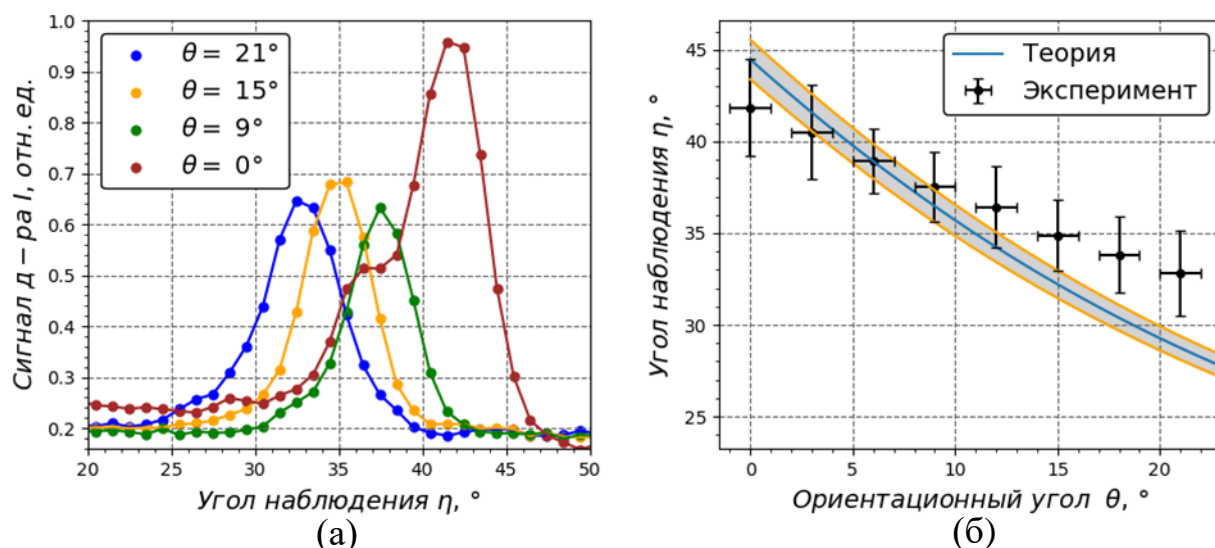


Рисунок 23 – Ориентационные зависимости: (а) – динамика угловых зависимостей ИВЧ от тефлоновой призмы, (б) – сравнение экспериментально измеренной и теоретически рассчитанной ориентационных кривых

Динамика пиков ИВЧ, представленная на рисунке 23.а, качественно сходится с поведением угловых распределений рассчитанных по формуле (16) работы [2] – при увеличении угла ориентации тефлоновой мишени уменьшается интенсивность пика ИВЧ. Теоретическая кривая, рассчитанная по формуле (1.29) (см. рисунок 23.б), не согласуется полностью с данными эксперимента, причиной чего может быть интерференция дифракционного излучения от передней грани тефлоновой призмы с ИВЧ, которая становится существенной при углах ориентации больше 15° .

Далее, под углом 44.4° к направлению распространения ИВЧ (см. рисунок 21) от тефлоновой призмы при угле ориентации $\theta = 0^\circ$ устанавливался плоский медный экран для отражения пучка фотонов ИВЧ в ИМП (см. рисунок 24). Необходимо уточнить, что спектр ИВЧ измерялся для углового распределения, изображённого на рисунке 21.

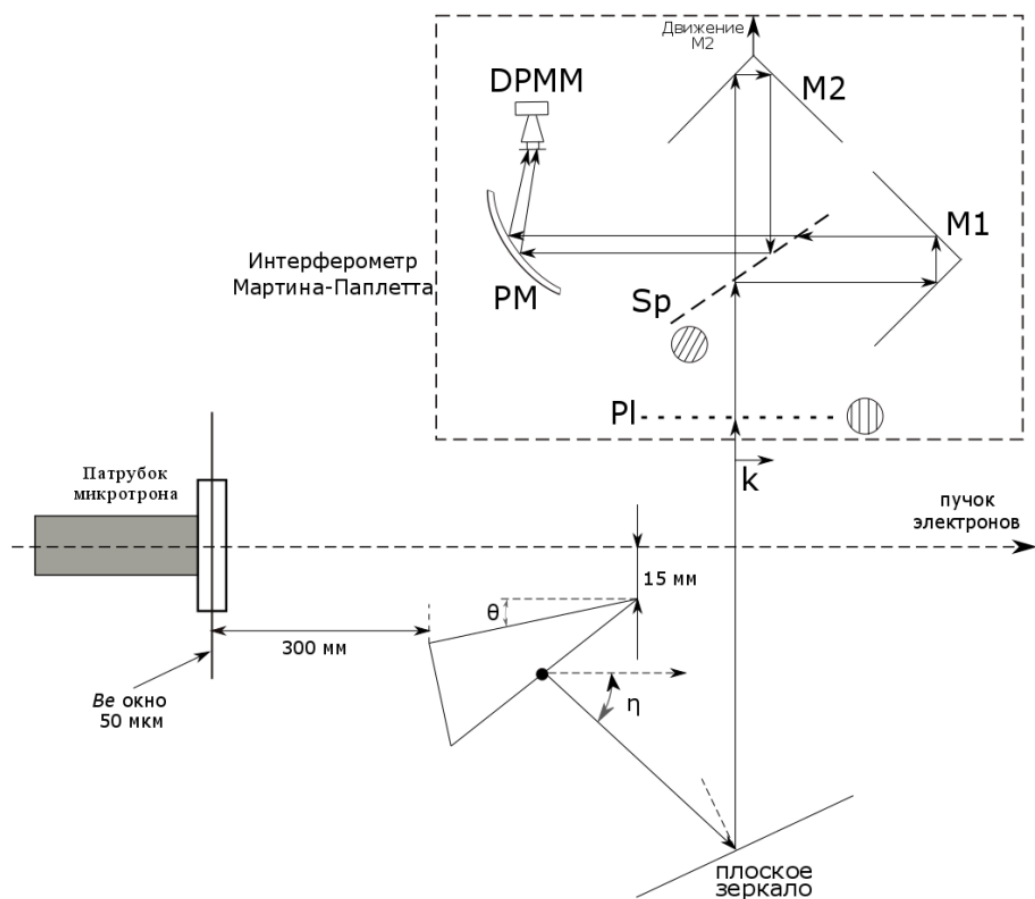


Рисунок 24 – Схема измерения интерферограммы ИВЧ от тефлоновой призмы: PI – горизонтальный поляризатор, Sp – делитель пучка поляризационного типа, M1 – неподвижное уголковое зеркало, M2 – подвижное уголковое зеркало, PM – параболическое зеркало, DPMM – детектор с запределным волноводом

На рисунке 25а представлена интерферограмма ИВЧ, обработанная по алгоритму, описанному в подразделе 2.5. Спектр ИВЧ (см. рисунок 25б) состоит из 2 спектральных линий, соответствующих 4 и 5 резонансам по трэину, чьи FWHM спектральных пиков сходятся в пределе ошибок измерения с аналитической моделью разработанной в работе [2] и учётом экспериментальных условий по формуле (1.50).

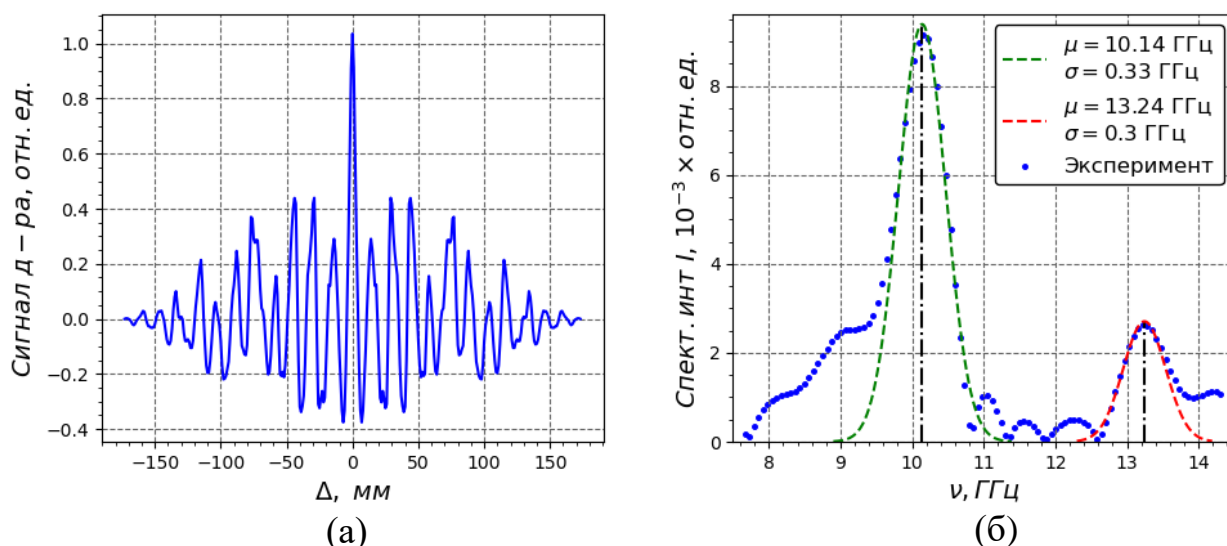


Рисунок 25 – Результаты спектральных измерений ИВЧ:

(а) – обработанная интерферограмма ИВЧ от тефлоновой призмы,

(б) – спектр ИВЧ от тефлоновой призмы

Спектральная интенсивность и FWHM спектральной линии 4 резонанса по трэину составляют $I = 9.39 \cdot 10^{-3}$ отн. ед. и $FWHM_{\text{эксп}} = 0.78$ ГГц. Теоретически рассчитанная FWHM спектральной линии 4 резонанса по трэину по формуле (1.42) равна $FWHM_{\text{теор}} = 0.78$ ГГц, что позволяет судить об удовлетворительной настройке всех систем микротрона, также как о влиянии резонансной структуры трэина микротрона на спектр ИВЧ от тефлоновой призмы (см. подразделы 2.2.2 и 2.4.3). Величина спектральной интенсивности и FWHM спектральных линий ИВЧ необходима для сравнения с ДИ от многослойной мишени.

4.2.3 Измерение спектрально-угловых характеристик ДИ от многослойной призмы

Геометрия измерения, изображённая на рисунке 28, такая же как и для тефлоновой призмы. Измеренная угловая зависимость имеет вид, представленная на рисунке 29.

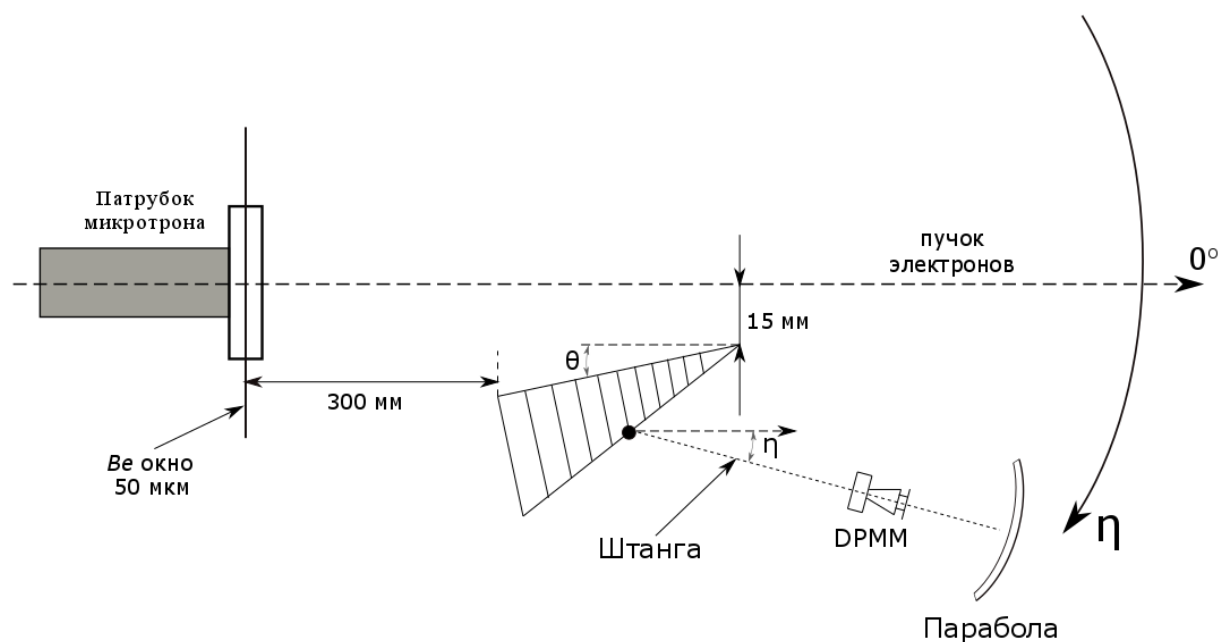


Рисунок 26 – Схема измерения угловых зависимостей ДИ от многослойной призмы

Вид ориентационной зависимости не сходится с дисперсионным соотношением, когда спектры излучения полностью согласуются с представлением мишени как набора плоских волноводов с градиентом длины слоёв.

Решение данной проблемы было найдено в интерпретации подобной структуры как мишени квази-ИВЧ с эффективным показателем преломления, являющейся тензорной величиной [7].

В данном случае необходимо вычислить величину эффективного показателя преломления для связи между углом ориентации мишени и угла наблюдения пика квази-ИВЧ. Ниже представлены аппроксимированные пики квази-ИВЧ от многослойной мишени.

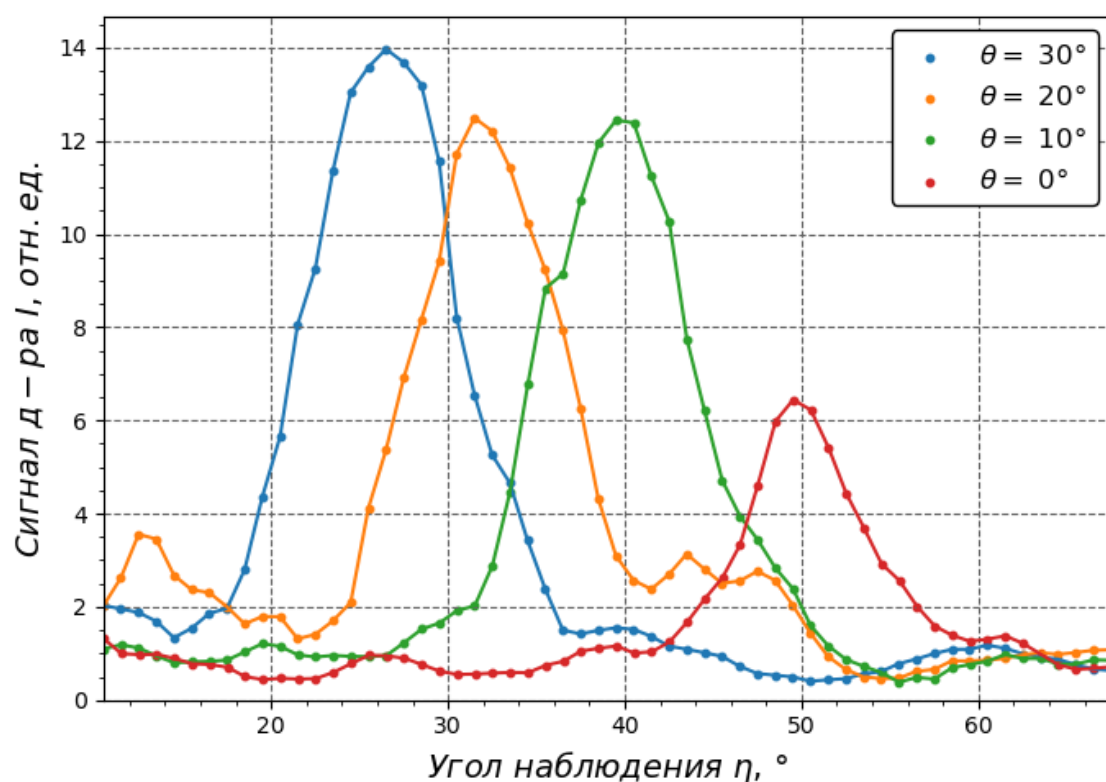


Рисунок 27 – Динамика угловых зависимостей ДИ от многослойной призмы

Видно, что интенсивность ДИ от многослойной призмы больше на порядок чем интенсивность ИВЧ от тефлоновой призмы. Динамика угловых зависимостей иллюстрирует смещение пиков углового распределения ДИ в меньшие углы при увеличении угла ориентации θ многослойной призмы. Далее угловые распределения нормировались на интенсивность пика ДИ при $\theta = 30^\circ$ для сравнения эксперимента с численным моделированием. Результаты аппроксимации нормированных угловых зависимостей представлены на рисунке 28.

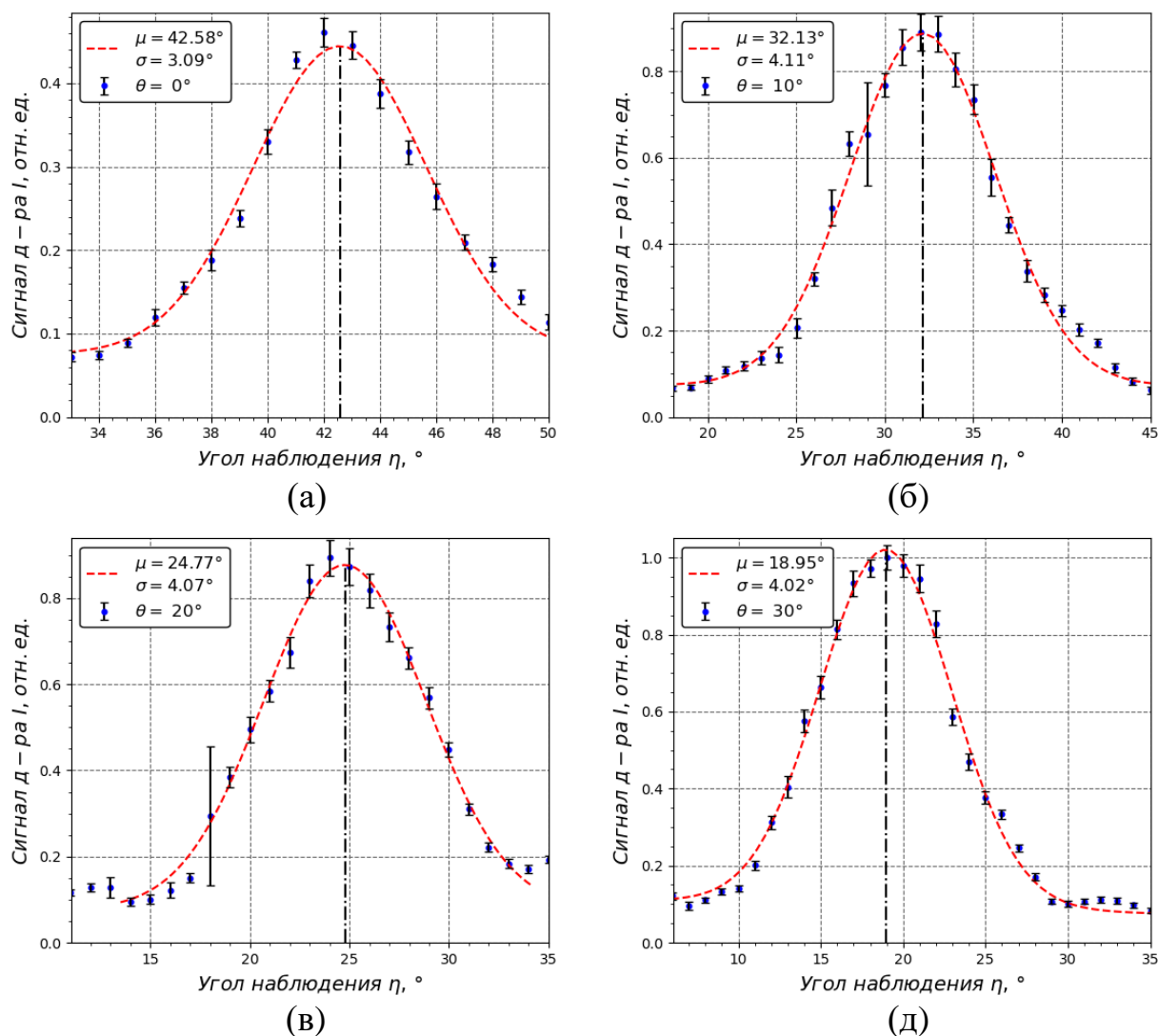


Рисунок 28 – Аппроксимированные пики ДИ:

(а) $\theta = 0^\circ$, (б) $\theta = 10^\circ$, (в) $\theta = 20^\circ$, (г) $\theta = 30^\circ$

На рисунке 28 не приведена ошибка вдоль оси абсцисс, потому что измерение угловой зависимости производилось против часовой стрелки, то есть параболический телескоп плавно подвигался к траектории пучка электронов. Ошибка позиционирования составляет 5% - за проход параболическим телескопом в 150° происходит накопление ошибки 7.5° .

Так как все пики детектируются в самом конце прохода параболического телескопа, то ошибка позиционирования предполагается максимальной, то есть 7.5° . Указание ошибки такой величины вдоль оси абсцисс приведёт к потере информативности рисунка 28.

Вычислялся эффективный показатель преломления по выражению (1.37):

Таблица 8 – Величины эффективного показателя преломления

$\theta, ^\circ$	$\eta_{ch}, ^\circ$	$\eta_{qch}, ^\circ$	n_{eff}
0	44.47	50.08	1.586
10	35.71	39.63	1.551
20	29.27	32.27	1.536
30	24.82	26.45	1.512

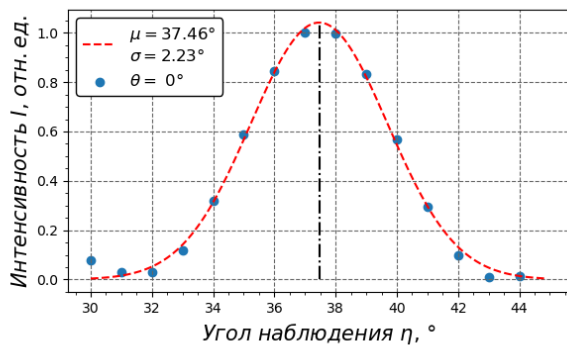
Если учесть накопление ошибки позиционирования параболического телескопа, то эксперимент и численное моделирование сходятся.

Таблица 9 – Сравнение результатов проведённого эксперимента и численного моделирования

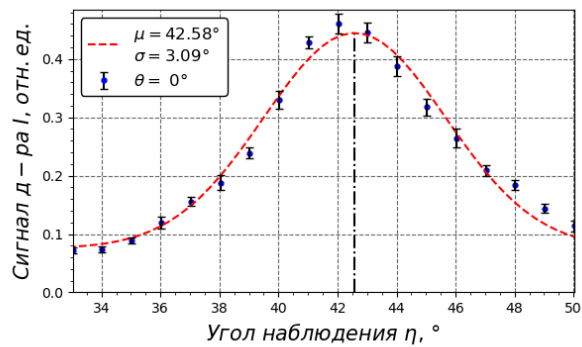
$\theta, ^\circ$	$\eta_{\text{эксп}}, ^\circ$	$\sigma_{\text{эксп}}, ^\circ$	$\eta_{\text{мод}}, ^\circ$	$\sigma_{\text{мод}}, ^\circ$
0	42.58 ± 7.5	3.09	37.46	2.23
10	32.13 ± 7.5	4.11	31.47	3.03
20	24.77 ± 7.5	4.07	25.97	3.89
30	18.95 ± 7.5	4.02	22.24	4.69

Сравнение пиков углового распределения численного моделирования и эксперимента представлено на рисунке 29.

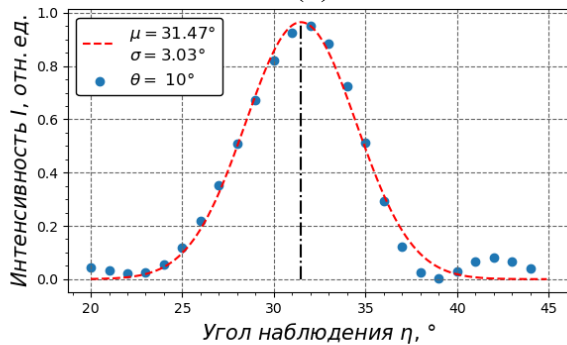
На рисунке 31а представлена интерферограмма ДИ, обработанная по алгоритму, описанному в подразделе 2.5. Следует упомянуть, что количество добавляемых нулей, равное 1000 штук, к концу интерферограмм было одинаковым для обработки спектров ИВЧ и ДИ.



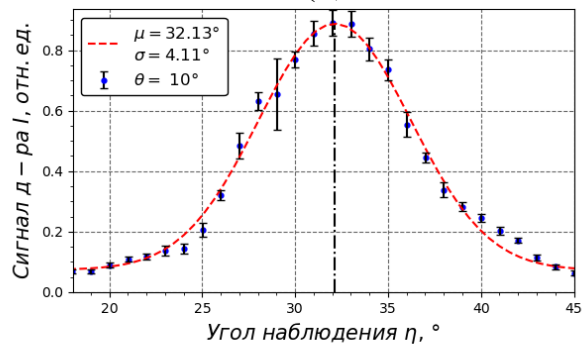
(а)



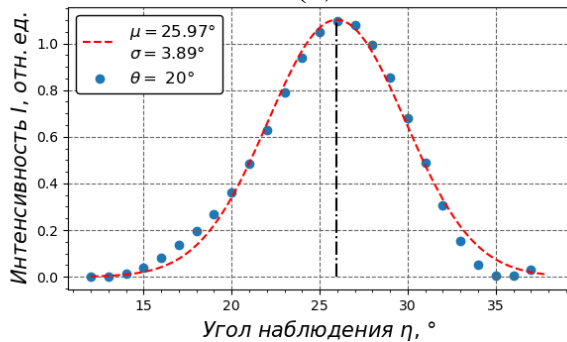
(б)



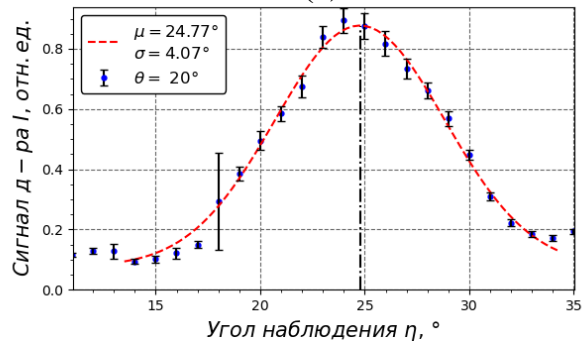
(в)



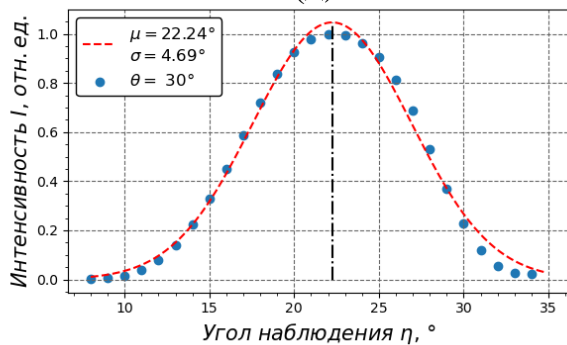
(г)



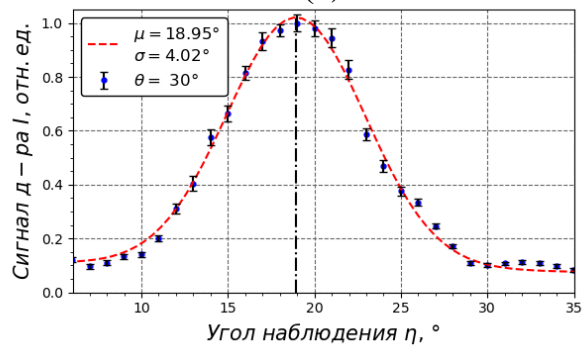
(д)



(е)



(ё)



(ж)

Рисунок 30 – Сравнение результатов численного моделирования и проведённого эксперимента

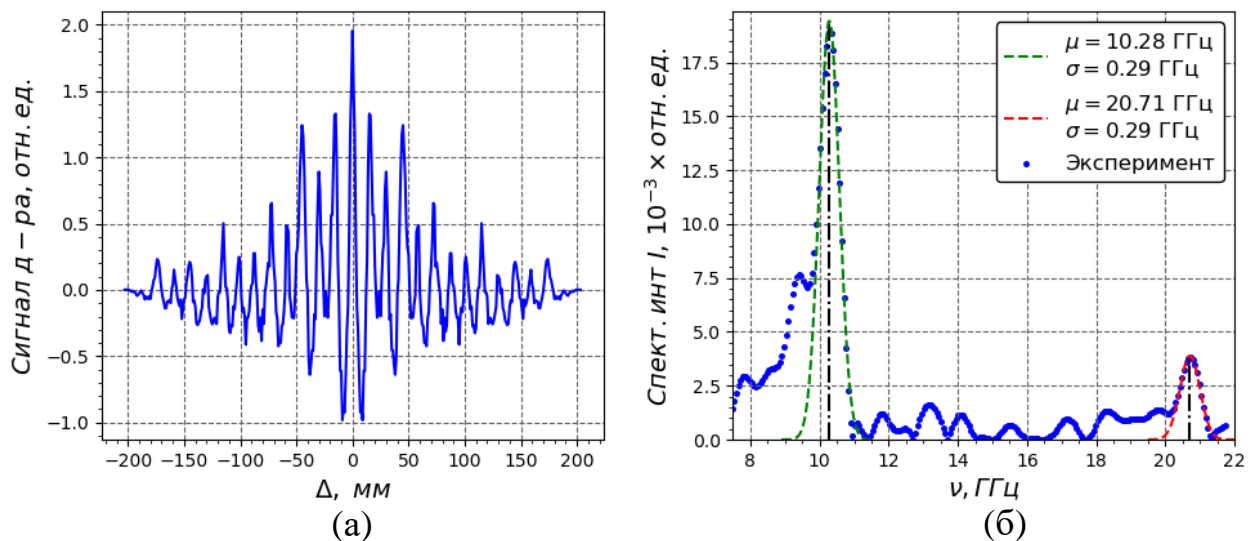


Рисунок 31 – Результаты спектральных измерений ДИ:

(а) – обработанная интерферограмма ДИ от многослойной призмы,

(б) – спектр ДИ от многослойной призмы

Спектр ДИ (см. рисунок 31б) состоит из 2 спектральных линий, соответствующим 4 и 8 резонансам по трэину (см. таблицу 2), совпадающие с 2 и 4 резонансам плоских волноводов мишени (см. формулу 1.38). Спектральная интенсивность и FWHM спектральной линии 4 резонанса по трэину и 2 резонанса плоского волновода составляют $I = 19.42 \cdot 10^{-3}$ отн. ед. и $FWHM_{\text{эксп}} = 0.68$ ГГц. Теоретически рассчитанная FWHM спектральной линии по формуле (1.42) равна $FWHM_{\text{теор}} = 0.66$ ГГц.

На рисунке 31б видно, что FWHM спектральных пиков ДИ от многослойной мишени меньше чем, FWHM спектральных пиков ИВЧ от тефлоновой призмы (см. рисунок 25б), при этом спектральные интенсивности ДИ в 2.08 раз больше чем спектральная интенсивность ИВЧ.

5 Исследование пассивных отклоняющих диэлектрических структур

5.1 Пучок линейного ускорителя КЕК-LUCX

Генерация резонансного ИВЧ при пролёте пучка заряженных частиц внутри гофрированной диэлектрической структуры параллельно оси структуры, теоретически и экспериментально исследованное в работе [30], обладает интенсивностью излучения, нормированной на ток пучка, сравнимой с интенсивностью когерентного ПИ от металлического экрана. На рисунке 5.а в работе [30] представлена зависимость нормированной на ток пучка интенсивности резонансного ИВЧ от расстояния между центром пучка и осью корругированной структуры. Указанная зависимость демонстрирует увеличение выхода нормированной на ток интенсивности резонансного ИВЧ с ростом расстояния между центром пучка и осью гофрированной структуры в пределах поперечного сечения пучка заряженных частиц, то есть до того как пучок начнёт физически контактировать со структурой, что приводит к генерации ПИ и тормозного излучения (геометрическое ограничение, вводимое внутренним минимальным радиусом гофрированной структуры).

Увеличение интенсивности, а следовательно и напряжённости вектора электрического поля, резонансного ИВЧ при непараллельном пролёте пучка электронов в гофрированной структуре может быть использовано для модуляции продольного профиля и фокусировке поперечного размера пучка электронов, следствием чего является увеличение плотности электронов в “ядре” пучка.

Для проверки данного предположения был поставлен эксперимент на электронном пучке линейного ускорителя КЕК-LUCX в режиме генерации одного сгустка. Эксперимент проводился при засветке Cs_2Te фотокатода импульсом 4-й гармоники Nd:YAG лазера (266 нм) [31] пикосекундной длительности и импульсом 3-й гармоники Ti:Sapphire лазера [31] фемтосекундной длительности.

Таблица 10 – Параметры пучка электронов КЕК-LUCX

Параметр	Лазер Nd:YAG [27]	Лазер Ti:Sapphire [27]
Заряд, Q	1 нКл	10 пКл
Энергия, E	8 МэВ	8 МэВ
Монохроматичность пучка $\Delta E/E$	0.3 %	0.3 %
Продольный размер пучка, σ_z	300 мкм	75 мкм
Поперечный размер пучка $\sigma_x \times \sigma_y$	300×300 мкм ²	300×300 мкм ²
Нормализованный эммитанс, $\epsilon_x \times \epsilon_y$	$4.7 \times 6.5 \pi$ мм·мрад	-
Частота следования, ν_{tr}	12.5 трэина/с	3.13 трэина/с

5.2 Схема эксперимента

Пучок электронов, вырванный из Cs:Te фотокатода при засветке лазерными импульсами, ускоряется в ВЧ структуре до 8 МэВ, состоящей из 3.6 ускоряющих ячеек. Далее пучок попадает в поле соленоида, где происходит уменьшение поперечных размеров. После соленоида пучок направляется в диэлектрическую структуру. Диэлектрическая структура расположена в устройстве позиционирования мишеней, оснащённом 5 степенями свободы: 3 поступательные и 2 вращательные [31]. После диэлектрической структуры расположен люминисцентный экран. Необходимо уточнить, что люминисцентный экран расположен в части вакуумного тракта, где отсутствует дисперсия (в англоязычной литературе “dispersion-free location”). Испущенный свет от люминисцентного экрана, в видимом диапазоне длин волн, детектируется CCD камерой. На входе CCD камеры установлен объектив, позволяющий измерять поперечный профиль и позицию центра пучка с разрешением 5 мкм.

Гофрированная структура представляет собой набор кварцевых колец (см. рисунки 32.а и 32.б) с геометрическими размерами: $r_1 = 2$ мм, $r_2 = 2.2$ мм, $r_3 = 2.7$ мм. Общая длина диэлектрической гофрированной структуры l равняется 60 мм, период одной гофры (ячейки наборной структуры) d составляет 0.5 мм.

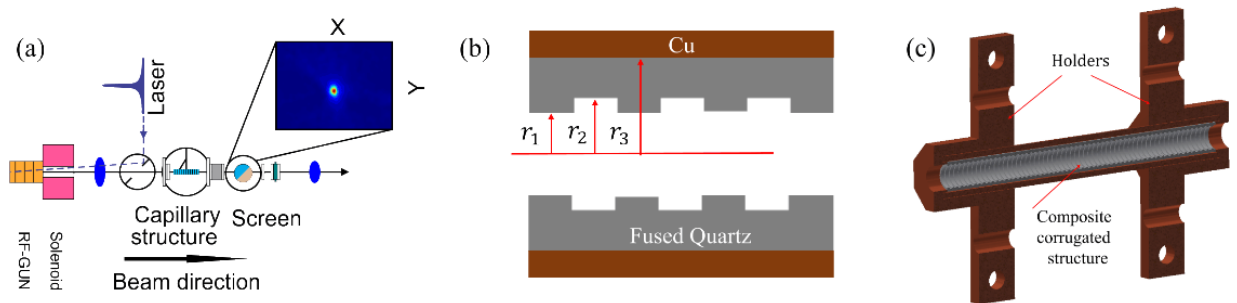


Рисунок 32 – Постановка эксперимента: (а) – схема эксперимента, (б) – поперечное сечение корругированной структуры, (с) – общий вид структуры с держателем

Для точного позиционирования диэлектрической структуры снималась электрограмма (“тень” диэлектрической структуры и системы крепления). Для съёма электрограммы пучок расфокусировался уменьшением магнитного поля соленоиды (см. рисунок 32.а).

При расфокусировке пучка, электроны физически взаимодействуют с самой диэлектрической структурой и системой крепления, вследствие чего генерируется тормозное излучение широкого спектра. Тормозное излучение и часть прошедших через структуру электронов, также как не испытывшее взаимодействия гало расфокусированного пучка, взаимодействуют с люминисцентным экраном. Необходимо сделать 2 уточнения. Первое уточнение, что вероятность (сечение реакции) возникновения люминисценции, в оптическом диапазоне длин волн, под воздействием заряженных частиц выше, чем для фотонов тормозного излучения, что приводит к детектированию контрастной картинки (см. рисунок 32.б).

На контрастной картинке чётко видны размеры прошедшей части пучка электронов и его гало (светлая часть рисунка 33.b). Второе уточнение, что длина гофрированной структуры в 60 мм, коллимирует пучок, достигая малой угловой расходимости.

До экрана долетает коллимированный пучок электронов, что даёт геометрическую привязку центра диэлектрической структуры и, самое главное, позволяет оценить угол наклона диэлектрической структуры относительно направления движения пучка электронов.

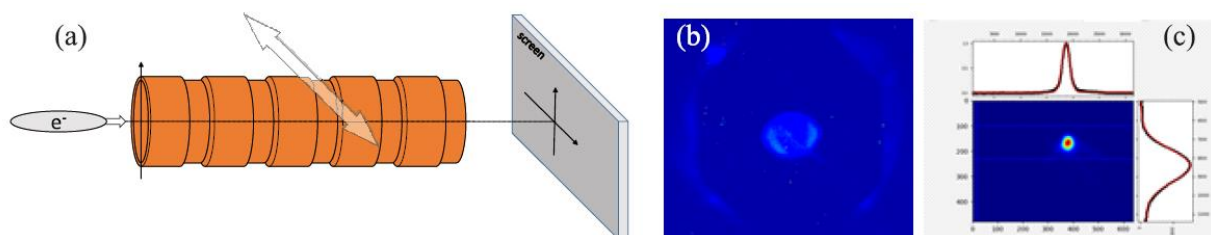


Рисунок 33 – Пример измеряемых зависимостей: (a) – схема распространения пучка, (b) – электрограмма мишени, (c) – проекция поперечного сечения пучка

Необходимо сделать замечание, что далее выражения “центр пучка” заменяется на “пучок”, а “относительно центра пучка в отсутствии пучка” на “относительно оси”.

После снятия электрограммы центр структуры позиционировался по пучку. В качестве опорного измерения мишень отодвигалась в сторону, чтобы измерить начальные параметры пучка.

Измерялись 4 типа зависимостей снимались как для пучка пикосекундной, так и фемтосекундной длительностей:

1. отклонение пучка от сдвига гофрированной структуры относительно оси;
2. поперечный размер пучка от сдвига гофрированной структуры относительно оси;
3. величина прошедшего заряда пучка от сдвига гофрированной структуры относительно оси;
4. отклонение пучка относительно центра от начального заряда пучка, то есть до того, как пучок прошёл через гофрированную структуру.

5.3 Результаты эксперимента

5.3.1 Алгоритм обработки данных

Для обработки данных использовался следующий алгоритм:

1. импорт экспериментальных данных из файла формата “.fit”;
2. данные каждого снимка CCD камеры аппроксимировались распределением Гаусса;
3. данные 10 снимков усреднялись и записывались в формат “.txt”;
4. строились необходимые экспериментальные зависимости отклонения пучка от позиции структуры, величины заряда прошедшего пучка от позиции структуры и позиция пучка от начального заряда (до прохождения пучка структуры).

Программный код, написанный на языке программирования Python 3.x, для обработки экспериментальных данных на пучке линейного ускорителя KEK-LUCX представлен в приложении Б.

5.3.2 Измерения с пучком электронов пикосекундной длительности

На рисунке 34 отображены изображения CCD-камеры для различных смещений центра гофрированной структуры относительно центра пучка электронов при засветке фотокатода импульсом 4-й гармоники Nd:YAG лазера [31]. Чётко видно, что при прохождении вдоль или параллельно оси гофрированной структуры происходит фокусировка пучка в горизонтальном направлении, когда в вертикальном направлении он остаётся приблизительно равным первоначальному, за исключением смещения выше 1.2 мм, где часть пучка касается поверхности сруктуры, что приводит к увеличению поперечного размера в горизонтальном направлении и уменьшению в вертикальном направлении.

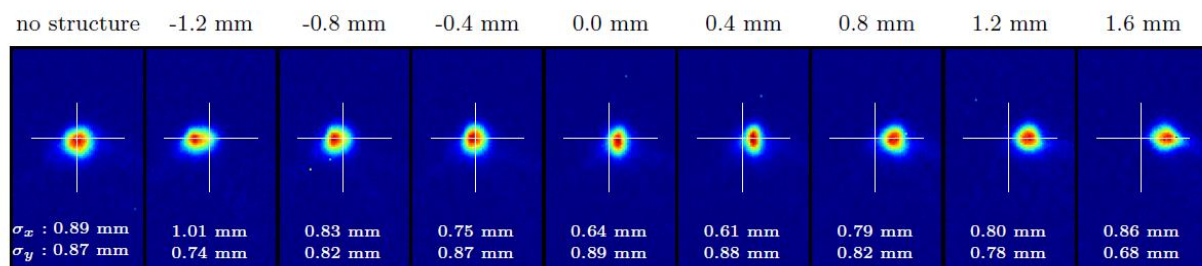


Рисунок 34 – Снимки CCD камеры при различных смещениях структуры для пучка пикосекундной длительности.

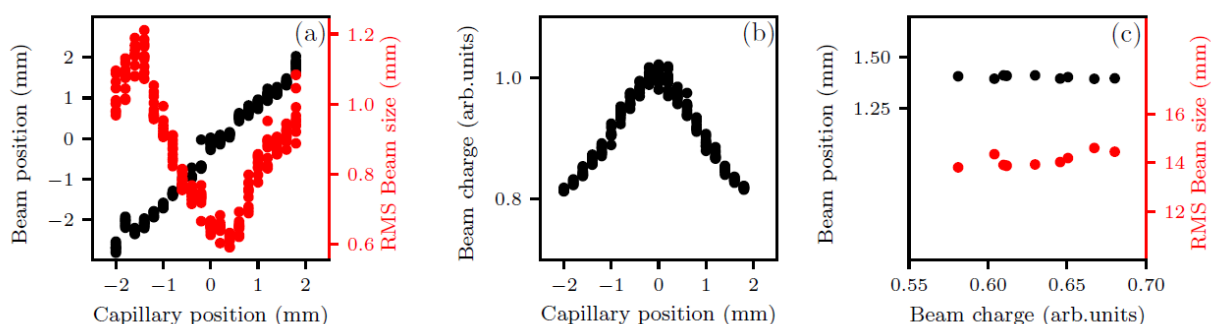


Рисунок 35 – Экспериментальные зависимости: (а) – позиция пучка и поперечные размеры (вдоль оси x) от позиции структуры, (b) – заряд пучка от позиции структуры, (с) – размер и позиция пучка от величины заряда

Зависимость позиции центра пучка относительно смещения структуры и величины поперечного размера пучка в горизонтальном направлении практически линейны в интервале от -2 до 2 мм (см. рисунок 35.a). При смещении гофрированной структуры относительно центра пучка на 2 мм потери заряда составляют 20% (см. рисунок 35.b).

На рисунке 35.c показано, что позиция центра пучка и поперечный размер в горизонтальном направлении, до пролёта внутри гофрированной структуры, не зависят от величины начального заряда.

5.3.3 Измерения с пучком электронов фемтосекундной длительности

Для пучка электронов фемтосекундной длительности, генерируемом при засветке фотокатода импульсом 3-й гармоники Ti:Sapphire лазера [31], не наблюдалось отклонения пучка электронов при смещении диэлектрической структуры относительно центра.

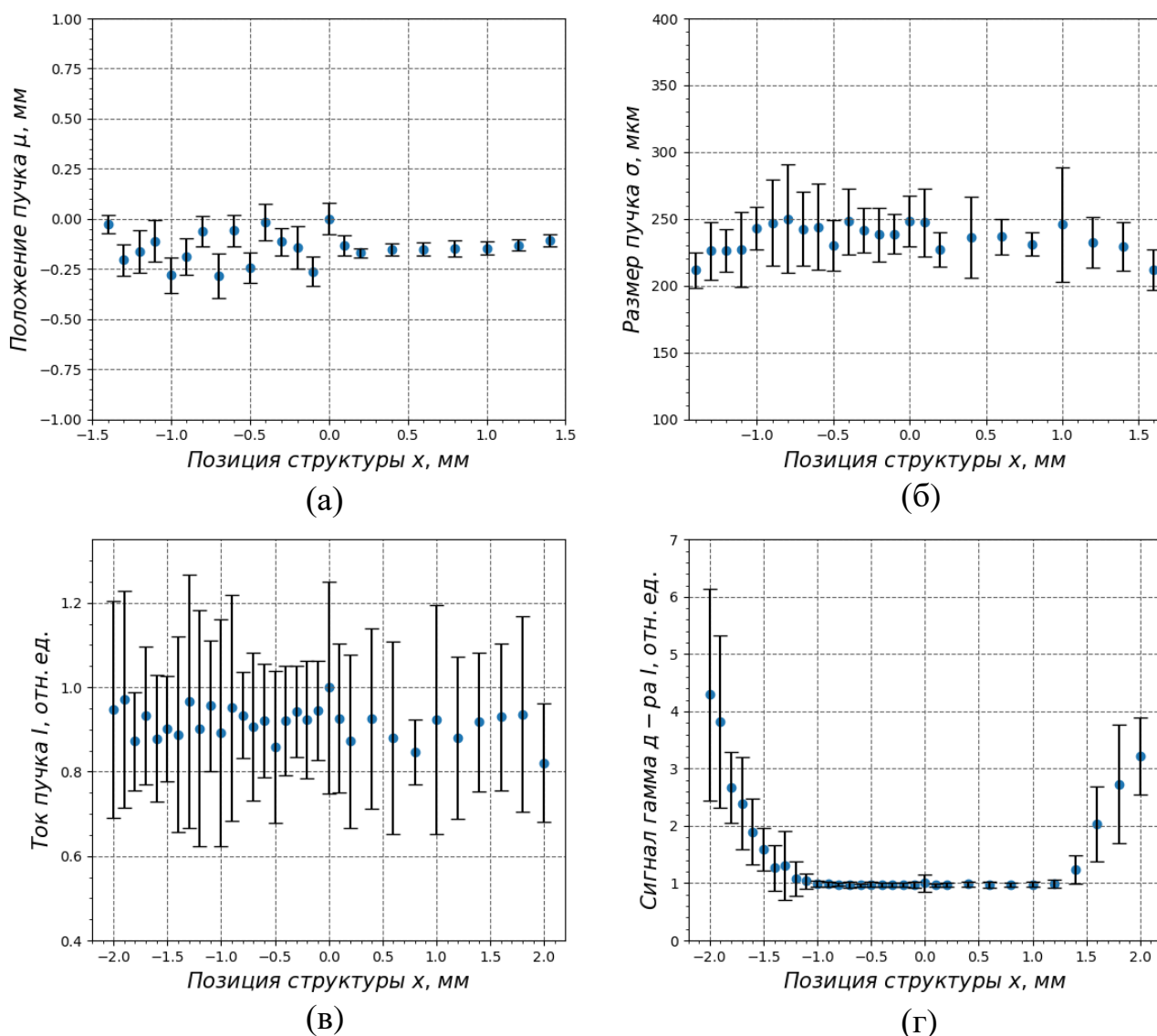


Рисунок 36 – Экспериментальные зависимости: (а) – смещение пучка от позиции структуры, (б) – поперечный размер пучка (вдоль оси x) от позиции структуры, (в) – токовая зависимость от позиции структуры, (д) – сигнал гамма-детектора от позиции структуры

Причина отсутствия эффекта отклонения пучка электронов объясняется малой величиной заряда пучка электронов, так как в сравнении со случаем генерации пучка Nd:YAG лазером заряд на 3 порядка меньше, что приводит к уменьшению величины напряжённости электрического поля резонансного ИВЧ от корругированной диэлектрической структуры.

В дальнейшем, планируется повторить эксперимент со схемой генерации пучка электронов заветкой фотокатода импульсом 4-й гармоники Nd:YAG лазера и дополнить имеющиеся экспериментальные данные измерениями зависимостей сигнала гамма детектора (см. рисунок 32а) от величины смещения структуры, также как показать переход от поляризационного механизма отклонения банчируемого пучка электронов [30] к электростатическому механизму [19].

Заключение

В процессе выполнения магистерской диссертации:

1. проведён обширный обзор литературы по тематике генерации поляризационного излучения в резонансных условиях (от периодических структур);
2. проведено численное моделирование генерации ДИ от многослойной призмы для параметров выведенного пучка микротрона НИ ТПУ и взаимодействия пучка фотонов стендового ГГц источника с многослойной призмой;
3. проведены измерения угловых распределений излучения при взаимодействии пучка фотонов стендового ГГц источника с многослойной призмой;
4. проведён эксперимент по измерению спектрально-угловых распределений ДИ от многослойной призмы на выведенном пучке микротрона НИ ТПУ;
5. показано, что спектральная интенсивность ДИ от многослойной призмы больше в 2.08 раз, чем спектральная интенсивность ИВЧ от тефлоновой призмы. Измерения спектров выполнены с использованием интерферометра Мартина-Паплетта;
6. впервые в мире проведён эксперимент по исследованию отклонения банчируемого релятивистского пучка электронов при пролёте через гофрированную диэлектрическую структуру.

6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

6.1 Введение

Основной задачей данного раздела является оценка перспективности научного исследования и планирование финансовой и коммерческой ценности конечных результатов, предлагаемого в рамках научного исследования (НИ). Коммерческая ценность определяется не только наличием более высоких технических характеристик над конкурентными исследованиями, но и тем, насколько быстро разработчик сможет ответить на такие вопросы – будет ли продукт востребован на рынке, какова будет его цена, какой бюджет научного исследования, какое время будет необходимо для продвижения результатов научного исследования на рынок.

Данный раздел, предусматривает рассмотрение следующих задач:

- Оценка коммерческого потенциала научного исследования;
- Планирование научного исследования;
- Расчет бюджета научного исследования;
- Определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности научного исследования.

Цель работы – экспериментальная верификация спектрально-угловых зависимостей интенсивности излучения от многослойной призмы на микротроне НИ ТПУ, численное моделирование спектрально-угловых зависимостей в программном пакете CST Studio Suite для параметров пучка электронов микротрона НИ ТПУ и сравнение с зависимостями ИВЧ от диэлектрической тефлоновой призмы.

6.2 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережений

6.2.1 Анализ конкурентных технических решений

Детальный анализ условий генерации излучения необходим, так как каждая схема генерации имеет свои достоинства и недостатки (монохроматичность спектра излучения, интенсивность излучения, характеристики спектрально-угловых зависимостей, перестраиваемость спектра).

Вариант 1 – Генерация когерентного излучения Вавилова-Черенкова при пролёте вблизи диэлектрического клина релятивистского пучка электронов;

Вариант 2 – Генерация когерентного переходного излучения при пересечении мишени коротким релятивистским пучком электронов.

Вариант 3 – Генерация когерентного дифракционного излучения при пролёте вблизи многослойной конической мишени релятивистского пучка электронов.

Данный анализ производится с применением оценочной карты, приведенной в таблице 10.

Экспертная оценка производится по техническим характеристикам и экономическим показателям по 5 бальной шкале, где 1 – наиболее низкая оценка, а 5 – наиболее сильная. Общий вес всех показателей в сумме должен составлять 1.

Таблица 11 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентноспособность		
		Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3	Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
Простота конструкции мишени	0,05	4	4	4	0,2	0,2	0,2
Интенсивность излучения	0,15	2	5	4	0,3	0,75	0,6
Перестраиваемость спектра излучения	0,15	3	3	5	0,45	0,45	0,75
Монохроматичность спектра излучения	0,15	3	2	4	0,45	0,3	0,6
Отсутствие разрушения пучка электронов	0,2	4	2	4	0,8	0,4	0,8
Возможность автоматизации позиционирования мишени	0,1	4	5	4	0,4	0,5	0,4
Экономические критерии оценки эффективности							
Финансирование научного исследования	0,13	4	3	3	0,52	0,39	0,39
Предполагаемый срок эксплуатации мишени	0,07	3	3	4	0,21	0,21	0,28
Итого	1	27	27	32	3,33	3,2	4,02

Расчет конкурентоспособности, на примере простоты конструкции мишени, определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i = 0,05 \cdot 4 = 2,0 , \quad (6.1)$$

где K – конкурентоспособность проекта; B_i – вес показателя (в долях единицы); B_i – балл показателя.

Как видно из оценочной карты вариант исполнения №3 обладает всеми необходимыми генерации излучения: перестраиваемость и монохроматичность спектра, также обладает достаточно высокой интенсивностью, но самое главное преимущество – это отсутствие разрушения пучка заряженных частиц.

6.2.2 SWOT-анализ

Для комплексной оценки научно-исследования применяют SWOT-анализ, результатом которого является описание сильных и слабых сторон проекта, выявление возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде. Итоговая матрица SWOT-анализа представлена в таблице 11.

Таблица 12 – SWOT-анализ

	Strengths (сильные стороны)	Weaknesses (слабые стороны)
	<p>S1. Высокая степень монохроматичности спектра излучения.</p> <p>S2. Отсутствие эффекта разрушения пучка электронов (отсутствие возмущения).</p> <p>S3. Перестраиваемость спектра излучения.</p> <p>S4. Высокая интенсивность спектра излучения.</p> <p>S5. Компактность источника излучения.</p> <p>S6. Низкая стоимость изготовления и установки мишени.</p>	<p>W1. Необходимо провести исследования на нескольких источниках релтивистских электронов.</p> <p>W2. Электромагнитное излучение СВЧ системы микротрона.</p> <p>W3. Некогерентное переходное излучение при пересечении галом пучка многослойной призматической мишени.</p>
<p>Opportunities (возможности)</p> <p>O1. Потребность улучшения качества сканирующих систем аэропортов.</p> <p>O2. Требование к степени монохроматичности ТГц излучения для нужд ИК-спектроскопии.</p> <p>O3. Рост числа публикаций и заинтересованности научного сообщества в тематике исследования.</p>	<p>O1 – S1, S2, S3, S4, S5 Использовать технологию генерации излучения для охранных сканирующих систем аэропортов для повышения уровня безопасности.</p> <p>O2 – S1, S2, S3, S4, S5, S6 Использовать технологию для внедрения в спектроскопические метрологические станции в научно-исследовательских институтах и центрах коллективного пользования.</p> <p>O3 – S1, S2, S3, S4, S5 Продолжение исследований для победы в конкурсах грантов РФФИ, РНФ и т.д.</p>	<p>O2, O3 – W1, W2, W3 Поддержка заинтересованных научно-исследовательских институтов и центров коллективного пользования в “beam time” (времени использования пучка электронов) ускорителей, имеющихся в их пользовании.</p> <p>O1 – W1 Целевая финансовая поддержка в исследовании со стороны аэропортов, что даст возможность арендовать “beam time” в центрах коллективного пользования.</p>

Продолжение таблицы 12.

<p>Threats (угрозы)</p> <p>T1. Существование классического источника на основе ондуляторного излучения.</p> <p>T2. Отсутствие финансирования научно-исследовательских институтов для покупки нового оборудования.</p>	<p>T1 – S1, S2, S3, S4, S5, S6 Малые габаритные размеры позволят уменьшить стоимость источника и повысить интенсивность излучения.</p> <p>T2 – S6 Мишень представляет из себя набор пластин с градиентом длины пластины, что позволит изготовить их в мастерской при любом научно-исследовательском институте.</p>	<p>T1 – W2, W3 Классический метод основан на использовании громоздких и дорогостоящих магнитов, для генерации классической схемы необходимы энергии выше чем для схемы генерации ДИ от многослойной мишени.</p> <p>T2 – W1, W2, W3 Для внедрения схемы генерации необходимы затраты на калибровку ускорителя заряженных частиц, командировку инженера. Можно произвести коллаборационное исследование с научно-исследовательским институтом и по результату написать статью в высокорейтинговый журнал, после чего подать заявку в фонды РФФИ или РНФ.</p>
--	--	--

Таблица 13 – Связь сильных сторон с возможностями

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
O1	+	+	+	+	+	0
O2	+	+	+	+	+	+
O3	+	+	+	+	+	0

Таблица 14 – Связь слабых сторон с возможностями

	W1	W2	W3
O1	+	0	0
O2	+	+	+
O3	+	+	+

Таблица 15 – Связь сильных сторон с угрозами

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
T1	+	+	+	+	+	+
T2	-	-	-	-	-	+

Таблица 16 – Связь слабых сторон с угрозами

	W1	W2	W3
T1	-	+	+
T2	+	+	+

На основе результатов анализа данной матрицы можно сделать вывод о том, что трудности и проблемы, с которыми так или иначе может столкнуться данный исследовательский проект можно будет решить за счет имеющихся сильных сторон исследования.

Заинтересованность современного научного сообщества в области спектроскопии и дефектоскопии, а также потребность в улучшении качества безопасности аэропортов позволяют сильным сторонам исследования превалировать над угрозами.

6.3 Планирование научно-исследовательской работы

6.3.1 Структура работ в рамках научного исследования

Комплекс предполагаемых работ включает в себя следующие задачи:

- определить структуру работ в рамках научного исследования;
- определить участников каждой работы;
- установить продолжительность работ;
- построить график проведения отдельных этапов исследования.

Для выполнения данного научного исследования необходимо сформировать рабочую группу, в состав которой входят руководитель и инженер. Для каждой из запланированных работ, необходимо выбрать исполнителя этой работы.

Разработанный список задач и производимых работ, в рамках проектирования, а также распределение исполнителей по этим работам, представлен в виде таблицы 16.

Таблица 17 – Список производимых задач и их исполнители

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований и изучение технической литературы	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
	3	Выбор направления исследования	Руководитель
	4	Календарное планирование работ по проекту	Инженер
			Руководитель
Экспериментальные исследования	5	Разработка методики эксперимента	Инженер
	6	Проведение численного моделирования в программном пакете CST Studio Suite	Инженер
	7	Проведение экспериментов	Руководитель
			Инженер
Обобщение и оценка результатов	8	Анализ и обработка экспериментально полученных данных	Инженер
	9	Сравнение обработанных данных с численным моделированием	Инженер
	10	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель
			Инженер
Оформление отчёта по НИР	11	Оформление выпускной квалификационной работы магистра	Инженер
Подготовка тезисов для международной конференции	12	Оформление тезисов международной конференции Channeling 2020 (Италия, середина летнего периода), IRRMA (Россия, осень 2020 года)	Инженер
			Руководитель

6.3.2 Определение трудоёмкости выполнения работ

Основная часть стоимости разработки проекта составляется из трудовых затрат, поэтому важно определить трудоемкость работ всех участников разработки проекта.

Несмотря на то, что трудоемкость зависит от трудно учитываемых параметров, т.е. носит вероятностный характер, ее можно определить экспертным путем, в «человеко-днях». Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости $t_{ожі}$ определяется по формуле:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{min\ i} + 2t_{max\ i}}{6}, \quad (6.2)$$

где $t_{min\ i}$ – минимально возможное время выполнения поставленной задачи исполнителем (является оптимистичной оценкой: при удачном стечении обстоятельств), чел.-дн.; $t_{max\ i}$ – максимально возможное время выполнения поставленной задачи исполнителем (является пессимистичной оценкой: при неудачном стечении обстоятельств, чел.-дн.

На основании расчетов ожидаемой трудоемкости работ, необходимо определить продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p :

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{\Psi_i}, \quad (6.3)$$

где Ψ_i – количество исполнителей, одновременно выполняющих поставленную задачу, чел.

По всем работам результаты расчета продолжительности в рабочих днях представлены в таблице 17.

6.3.3 Разработка графика проведения исследования

Диаграмма Ганта является наиболее удобным и наглядным способом представления графика проведения работ.

Диаграмма Ганта представляет собой отрезки, размещенные на горизонтальной шкале времени. Каждый отрезок соответствует отдельной задаче или подзадаче. Начало, конец и длина отрезка на шкале времени соответствуют началу, концу и длительности задачи.

Для построения графика Ганта, следует, длительность каждой из выполняемых работ из рабочих дней перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой, для каждого исполнителя расчеты производятся индивидуально:

$$T_{ki.рук} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (6.4)$$

$$T_{ki.инж} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (6.5)$$

где $k_{\text{кал}}$ – календарный коэффициент.

Календарный коэффициент определяется по формуле:

$$k_{\text{кал.рук}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (6.6)$$

$$k_{\text{кал. инж}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (6.7)$$

где $T_{\text{кал}}$ – общее количество календарных дней в году; $T_{\text{вых}}$ – общее количество выходных дней в году; $T_{\text{пр}}$ – общее количество праздничных дней в году.

Расчет трудоемкости и продолжительности работ, на примере задачи «Составление и утверждение технического задания»:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{min\ i} + 2t_{max\ i}}{6} = \frac{3 \cdot 5 + 2 \cdot 7}{6} = 4,8 \text{ ч. - дн.}$$

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{\text{Ч}_i} = \frac{4,8}{1} = 4,8 \text{ раб. дн.}$$

Рабочая неделя руководителя и инженера является 6-дневной, поэтому календарный коэффициент равен:

$$k_{\text{кал.рук}} = k_{\text{кал. инж}} = \frac{366}{366 - 56 - 14 - 48} \approx 1,48$$

Расчёт календарной продолжительности работы, на примере задачи «Составление и утверждение технического задания»:

$$T_{ki.\text{рук}} = T_{ki.\text{инж}} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}} = 4,8 \cdot 1,48 = 7,1 \approx 7 \text{ кал. дн.}$$

Все полученные значения в календарных днях округляются до целого числа, а затем сводятся в таблицу 8.

Таблица 18 – Временные показатели научно-исследовательской работы

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях T_{pi}		Длительность работ в календарных днях T_{ki}	
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{ож}$, чел-дни					
	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер
Составление и утверждение технического задания	5	-	7	-	4,8	-	4,8	-	7	-
Подбор и изучение материалов по теме	-	10	-	15	-	10	-	10	-	15
Выбор направления исследования	2	2	3	3	2	2	1	1	2	2
Календарное планирование работ по проекту	2	2	3	3	2	2	1	1	2	2
Разработка методики эксперимента	-	5	-	7	-	4,8	-	4,8	-	7
Проведение численного моделирования в программном пакете CST Studio Suite	-	15	-	20	-	14,17	-	14,17	-	21
Проведение экспериментов	14	14	21	21	14	14	7	7	10	10
Анализ и обработка экспериментально полученных данных	-	7	-	9	-	6,5	-	6,5	-	10
Сравнение обработанных данных с численным моделированием	-	2	-	3	-	2	-	2	-	3
Оценка эффективности полученных результатов	1	1	2	2	1,16	1,16	0,58	0,58	1	1

Продолжение таблицы 18

Оформление выпускной квалификационной работы магистра	-	7	-	10	-	6,83	-	6,83	-	10
Оформление тезисов международной конференции Channeling 2020 (Италия, середина летнего периода), IRRMA (Россия, осень 2020 года)	10	10	14	14	9,67	9,67	4,83	4,83	7	7
Итого	34	75	50	107	33,63	73,13	19,21	58,71	29	88

Таблица 19 – Календарный план-график в форме диаграммы Ганта

Вид работ	Исполнители	T_{ki} , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ																
			янв.			фев.			март			апр.			май			июнь	
			3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2		
Составление и утверждение технического задания	Руководитель	7																	
Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	15																	
Выбор направления исследования	Руководитель, Инженер	2																	
Календарное планирование работ по проекту	Руководитель, Инженер	2																	
Разработка методики эксперимента	Магистрант	7																	

Продолжение таблицы 19

Проведение численного моделирования в программном пакете CST Studio Suite	Инженер	1																	
Проведение экспериментов	Руководитель, Инженер	0																	
Анализ и обработка экспериментально полученных данных	Инженер	0																	
Сравнение обработанных данных с численным моделированием	Инженер																		
Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель, Инженер																		
Оформление выпускной квалификационной работы магистра	Инженер	0																	
Оформление тезисов международной конференции Channeling 2020 (Италия, середина летнего периода), IRRMA (Россия, осень 2020 года)	Руководитель, Инженер																		



-  – руководитель
-  – инженер

Таблица 20 – Сводная таблица по календарным дням

	Количество дней
Общее количество календарных дней для выполнения работы	95
Общее количество календарных дней, в течение которых работал инженер	88
Общее количество календарных дней, в течение которых работал руководитель	29

В результате выполнения подраздела был разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей, а также рассчитано количество дней, в течение которых работал каждый из исполнителей.

6.4 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. В процессе формирования бюджета, планируемые затраты группируются по статьям, представленным в таблице 21.

1. Материальные затраты.
2. Затраты на оплату труда работников, непосредственно участвующих в НИ.
3. Отчисления во внебюджетные фонды.
4. Спецоборудование для проведения экспериментальных работ.
5. Накладные расходы.

Статьи 1-7 относятся к прямым затратам, связанным непосредственно с выполнением конкретного НИ, остальные затраты рассчитываются косвенным способом, это затраты на содержание аппарата управления, общетехнических и общехозяйственных служб, они объединяются в статье «Накладные расходы».

6.4.1 Расчёт материальных затрат

За исключением проведения экспериментов на микротроне ТПУ все вычисления производились с использованием бесплатного программного обеспечения на личном персональном ПК, поэтому материальные затраты – это затраты на интернет, канцелярские принадлежности, бумагу и расходные материалы для изготовления мишени.

Таблица 21 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб	Затраты на материалы, руб
1. Доступ в интернет	–	4	350	1400
2. Комплект канцелярских принадлежностей deVente	Штука	1	439	439
3. Упаковка бумаги SvetoCopy (500 листов)	Штука	4	479	1916
4. Стеклотекстолит СТЭФ-1 0,5 мм (~1020x1220 мм)	Лист	1	567	567
5. Стекло кварцевое смотровое прямоугольное тип Г 50x50x50	Штука	3	1000	3000
Итого				7322

6.4.2 Расчёт амортизации специального оборудования для научного исследования

Данный раздел включает в себя все затраты, связанные с приобретением специального оборудования, необходимого для проведения экспериментальных работ по тематике научного исследования.

В данном научном исследовании к спецоборудованию, необходимому для проведения экспериментальных работ, относятся микротрон НИ ТПУ, который был собран сотрудниками университета, его ориентировочная стоимость составляет 2500000 рублей при назначенном сроке службы 30 лет. Также используются шаговый двигатель NEMA 23, поворотный механизм мишени(Vicon-Standa 7R171-200), интерферометр Мартина-Паплетта и стендовый ГГц излучатель.

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации:

$$H_A = \frac{1}{n}, \quad (6.8)$$

где n – срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация:

$$A = \frac{H_A * И}{12} * m, \quad (6.9)$$

где $И$ – итоговая сумма, тыс. руб.; m – время использования, мес.

Микротрон использовался в течение 14 рабочих дней (принимая $m = 0.5$) Таким образом, общая стоимость оборудования и его амортизация, использовавшегося в данной дипломной работе, представлена в таблице 22.

Для численных расчётов использовался персональный компьютер (ПК) в течении 780 часов рабочего времени. Расчёты производились численно в программе CST Studio Suite, которая решает численно уравнения Максвелла на сетке, поэтому требовалось столь длительное время расчёта. Срок полезного использования ПК марки DELL (DELL Precision T7610) составляет 5 лет:

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{5} = 0,2$$

$$m = \frac{780}{720} = 1,08$$

Рассчитаем амортизацию для микротрона ТПУ, с учётом, что срок полезного использования равен 30 лет:

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{30} = 0,033$$

Шаговый двигатель, поворотный механизм мишени (Vicon-Standa 7R171-200), интерферометр Мартина-Папплетта и стендовый излучатель в общей сложности использовались в течении 90 часов. Срок полезного использования каждого составляет 2 года. Следовательно время использования

$$m = \frac{90}{720} = 0,125 ,$$

где 720 – это количество часов в одном месяце.

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{2} = 0,5$$

Общую сумму амортизационных отчислений находим следующим образом:

Микротрон ТПУ:

$$A = \frac{H_A * И}{12} * m = \frac{0,033 * 250000 \text{ руб}}{12} * 0,5 \approx 3472 \text{ руб.}$$

Шаговый двигатель NEMA 23:

$$A = \frac{H_A * И}{12} * m = \frac{0,5 * 1721 \text{ руб}}{12} * 0,125 \approx 9 \text{ руб.}$$

Поворотный механизм мишени (Vicon-Standa 7R171-200):

$$A = \frac{H_A * И}{12} * m = \frac{0,5 * 15000 \text{ руб}}{12} * 0,125 \approx 78 \text{ руб.}$$

Интерферометр Мартина-Паплетта:

$$A = \frac{H_A * И}{12} * m = \frac{0,5 * 30000 \text{ руб}}{12} * 0,125 \approx 156 \text{ руб.}$$

Стендовый ГГц излучатель:

$$A = \frac{H_A * И}{12} * m = \frac{0,5 * 10000 \text{ руб}}{12} * 0,125 \approx 52 \text{ руб.}$$

ПК (DELL Precision T7610):

$$A = \frac{H_A * И}{12} * m = \frac{0,2 * 30000 \text{ руб}}{12} * 1,08 \approx 540 \text{ руб.}$$

Суммарные затраты амортизационных отчислений: 4307 рублей

Таблица 22 – Специальное оборудование для экспериментальных работ

Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, руб. За шт.	Амортизационные отчисления, руб
Микротрон ТПУ	1 шт	2500000	3472
Шаговый двигатель NEMA 23	3 шт	1721	9
Поворотный механизм мишени(Vicon-Standa 7R171-200)	1 шт	15000	78
Интерферометр Мартина-Паплетта	1 шт	30000	156
Стендовый ГГц излучатель	1 шт	10000	52
ПК (DELL Precision T7610)	1 шт	30000	
Итого		2586721	4307

6.4.3 Основная заработная плата труда исполнителей научного исследования

Раздел включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИ, включая премии, доплаты и дополнительную заработную плату.

$$C_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}, \quad (6.10)$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата, $Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата научного руководителя рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда, которая в ТПУ предполагает оклад, определяемый предприятием, и стимулирующие выплаты, устанавливаемые руководителем подразделений.

Основная заработная плата руководителя рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}}, \quad (6.11)$$

где $T_{\text{раб}}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, $Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника в рублях.

Дополнительная заработная плата включает оплату за непроработанное время (очередной и учебный отпуск, выполнение государственных обязанностей, выплата вознаграждений за выслугу лет и т.п.) и рассчитывается исходя из основной заработной платы работников, непосредственно участвующих в выполнении работ:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}}, \quad (6.12)$$

где $Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата в рублях, $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы, $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата в рублях.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{\text{дн}} = \frac{З_{\text{м}} \cdot М}{F_{\text{д}}}, \quad (6.13)$$

где $З_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб., $М$ – количество месяцев работ без отпуска в течение года, $F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала (в рабочих днях).

Количество месяцев работы без отпуска в течение года рассчитывается следующим образом: при отпуске в 48 рабочих дней $М = 10,4$ месяцев, 6-дневная рабочая неделя. В таблице 23 рассчитан действительный годовой фонд научно-технического персонала.

Таблица 23 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	366	366
Количество нерабочих дней		
– выходные дни	56	56
– праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
– отпуск	48	48
– невыходы по болезни	0	0
Действительный годовой фонд рабочего времени	248	248

Для руководителя:

$$З_{\text{м}} = З_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}} = 33775 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 65861 \text{ руб}$$

$$З_{\text{дн}} = \frac{З_{\text{м}} \cdot М}{F_{\text{д}}} = \frac{65861 \text{ руб.} \cdot 10,4 \text{ мес.}}{248 \text{ дн.}} = 2762 \text{ руб}$$

Для инженера:

$$З_m = З_{тс} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p = 17000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 33150 \text{ руб}$$

$$З_{дн} = \frac{З_m \cdot M}{F_d} = \frac{33150 \text{ руб.} \cdot 10,4 \text{ мес.}}{248 \text{ дн.}} = 1390 \text{ руб}$$

где $З_{тс}$ – заработная плата, согласно тарифной ставке, руб.; $k_{пр}$ – премиальный коэффициент, равен 0,3; k_d – коэффициент доплат и надбавок, равен 0,2; k_p – районный коэффициент, равен 1,3 (для г. Томска).

Таблица 24 – Расчёт основной заработной платы исполнителей

Исполнители НИ	$З_{тс}$, руб	$k_{пр}$	k_d	k_p	$З_m$, руб	$З_{дн}$, руб	T_p , раб.дн	$З_{осн}$, руб
Руководитель	33775	0,3	0,2	1,3	65861	2762	19	52478
Инженер	17000	0,3	0,2	1,3	33150	1390	59	82010
Итого:								134488

6.4.4 Дополнительная заработная плата исполнителей научного исследования

Дополнительная заработная плата рассчитывается по формуле (6.12). Коэффициент дополнительной заработной платы на протяжении выполнения всего НИ принимается $k_{\text{доп}} = 0,15$.

Для руководителя:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}} = 0,15 \cdot 52478 \text{ руб.} = 7872 \text{ руб.} \quad (6.14)$$

Для инженера:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}} = 0,15 \cdot 82010 \text{ руб.} = 12302 \text{ руб.} \quad (6.15)$$

Суммарная заработная плата инженера и руководителя составляет: 20173 рубля.

Таблица 25 – Расчёт дополнительной заработной платы

Исполнители	$З_{\text{осн}}$, руб	$k_{\text{доп}}$	$З_{\text{доп}}$, руб.	$С_{\text{зп}}$, руб.
Руководитель	52478	0,15	7872	60350
Инженер	82010	0,15	12302	94312
Итого			20174	154662

6.4.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Размер отчислений во внебюджетные фонды составляет 30% в 2020 от суммы затрат на оплату труда работников, непосредственно занятых НИ.

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}), \quad (6.16)$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений в внебюджетные фонды (пенсионное страхование, медицинское страхование, социальное страхование).

- 22 % – на пенсионное страхование;
- 5,1 % – на медицинское страхование;
- 2,9 % – на социальное страхование

Отчисления во внебюджетные фонды для руководителя:

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}) = 0.3 \cdot 60350 \text{ руб.} = 18105 \text{ руб.} \quad (6.17)$$

Отчисления во внебюджетные фонды для инженера:

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}) = 0.3 \cdot 94312 \text{ руб.} = 28294 \text{ руб.} \quad (6.18)$$

Общая сумма отчисления во внебюджетные фонды составляет: 46399 рублей.

6.4.6 Накладные расходы

При расчете накладных расходов учитываются оплата труда персонала, содержание зданий, оргтехники, амортизация имущества, расходы по охране труда и подготовке кадров. Также они включают в себя прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые расходы и т.д.

При выполнении работы использовался стационарный компьютер со средней мощностью 550 Вт (0,55 кВт). Если предположить, что вся работа выполнялась на нем, то всего было израсходовано:

$$E = P \cdot F_{об} = 0,55 \text{ кВт} \cdot 780 \text{ ч} = 429 \text{ кВт} \cdot \text{ч}, \quad (6.19)$$

где P – мощность оборудования измеряется в кВт·час, $F_{об}$ – время использования оборудования в часах.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по следующей формуле:

$$C = \Pi_{эл} \cdot E = 5,8 \text{ ч}^{-1} \cdot 429 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 2488 \text{ руб}, \quad (6.20)$$

где $\Pi_{эл}$ – тариф на промышленную электроэнергию (5,8 рублей за 1 киловатт в час).

Потребляемая мощность поворотного механизма мишени, стендового ГГц излучателя и шагового двигателя NEMA 23 составляют 110 Вт, 65 Вт и 110 Вт, соответственно:

$$E = (0,110 + 0,065 + 0,110) \text{ кВт} \cdot 90 \text{ ч} = 25.65 \text{ кВт} \cdot \text{ч}, \quad (6.21)$$

$$C = 5,8 \text{ ч}^{-1} \cdot 25.65 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 149 \text{ руб} \quad (6.22)$$

Также при проведении экспериментов использовался микротрон ТПУ, средняя мощность которого 250 кВт. Весь эксперимент проводился на микротроне из 14 рабочих дней, непосредственно в рабочем режиме ускоритель находился 30 часов (в предположении суммирования всего времени, когда ускоритель генерировал пучок релятивистских электронов). Получается, что израсходовано электроэнергии:

$$E = P \cdot F_{об} = 250 \text{ кВт} \cdot 30 \text{ ч} = 7500 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (6.23)$$

Затраты на электроэнергию, израсходованную при использовании ускорителя, рассчитывается по формуле:

$$C = \Pi_{эл} \cdot E = 5,8 \text{ ч}^{-1} \cdot 7500 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 43500 \text{ руб}, \quad (6.24)$$

Накладные расходы в данной работе составили 46137 руб.

6.5 Формирование бюджета затрат научного исследования

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основной для формирования бюджета затрат проекта. Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 26.

Таблица 26 – Расчёт бюджета затрат НИ

Наименование статьи	Стоимость затрат. руб. (руководитель + инженер)
1. Материальные затраты НИ	7322
2. Расчёты затрат на спецоборудование НИ	4307
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	134488
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	20174
5. Отчисления во внебюджетные фонды	46399
6. Накладные расходы	46137
7. Бюджет затрат НИ	258827

В ходе выполнения экономической части дипломной работы были проведены расчеты плановой себестоимости проведения НИ и времени, необходимого на проведение НИ. Плановая себестоимость работы составляет 258827 руб., больше половины составляют затраты на заработную плату исполнителям научного исследования и накладные расходы на электроэнергию.

6.6 Определение финансовой, бюджетной экономической эффективности исследования

6.6.1 Интегральный показатель финансовой эффективности

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации научного исследования принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносится финансовые значения по всем вариантам исполнения.

В качестве вариантов исполнения были выбраны ближайшие аналоги:

1. Схема генерации когерентного переходного излучения, базирующаяся на электромагнитном взаимодействии кулоновского поля пучка электронов при непосредственном пересечении пучка металлической пластины;
2. Схема генерации когерентного излучения Вавилова-Черенкова при пролёте короткого пучка электронов вблизи диэлектрического клина (материал тефлон). В данной схеме пучок не разрушается и может быть использован для установок находящихся далее по вакуумному тракту или экспериментальной камере.

Интегральный финансовый показатель научного исследования определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (6.25)$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель научного исследования, Φ_{pi} – стоимость i – го варианта исполнения, Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научного исследования (в т.ч. аналоги).

По той причине, что все аналоги исследования генерации излучения исследовались одновременно с центральной темой диплома, на одной и той же установке в одних и тех же экспериментальных сеансах инженером (автором данной работы), то затраты на электроэнергию равны для всех аналогов. Мишени, используемые для генерации излучения были безвозмездно предоставлены руководителем инженера и имеют одинаковую стоимость, поэтому интегральные финансовые показатели равны между собой:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.1}} = I_{\text{финр}}^{\text{исп.2}} = I_{\text{финр}}^{\text{исп.3}} = 1 \quad (6.26)$$

6.6.2 Интегральный показатель ресурсоэффективности

В данном разделе необходимо провести оценку ресурсоэффективности научного исследования, определяемую посредством интегрального критерия, по следующей формуле:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (6.27)$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности, a_i – весовой коэффициент, b_i – бальная система оценки проекта, устанавливаемая опытным путём по выбранной шкале оценивания.

Таблица 27 – Сравнительная оценка характеристик проекта

Критерии	Весовой коэффициент	Бальная оценка аналога 1	Бальная оценка аналога 2	Бальная оценка научного исследования
1. Монохроматичность спектра излучения	0,4	3	2	4
2. Интенсивность излучения	0,4	2	5	4
3. Перестраиваемость спектра излучения	0,2	3	3	5
Итого	1	2,6	3,4	4,2

Расчёт интегрального показателя для разрабатываемого проекта:

$$I_{p1} = 0,4 \cdot 3 + 0,4 \cdot 2 + 0,2 \cdot 3 = 2,6$$

$$I_{p2} = 0,4 \cdot 2 + 0,4 \cdot 5 + 0,2 \cdot 3 = 3,4$$

$$I_{p3} = 0,4 \cdot 4 + 0,4 \cdot 4 + 0,2 \cdot 5 = 4,2$$

6.6.3 Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\text{исп } i} = \frac{I_{p i}}{I_{\text{финр}}} \quad (6.28)$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта. Сравнительная эффективность проекта ($\mathcal{E}_{\text{ср}}$):

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{p1}}{I_{p2}} \quad (6.29)$$

Таблица 28 – Сводная таблица показателей оценки ресурсоэффективности

Показатели	Аналог 1	Аналог 2	Научное исследование в рамках ВКР
Интегральный финансовый показатель разработки	1	1	1
Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	2,6	3,4	4,2
Интегральный показатель эффективности	2,6	3,4	4,2
Сравнительная эффективность вариантов исполнения	0,62	0,8	1

В результате выполнения изначально сформулированных целей раздела, можно сделать следующие выводы:

1. результатом проведённого анализа схем-аналогов генерации излучения является выбор генерации когерентного дифракционного излучения при пролёте вблизи многослойной конической мишени релятивистского пучка электронов. Конкурентным преимуществом над аналогами является отсутствие разрушения пучка, перестраиваемость спектра и высокая степень монохроматичности при средней величине интенсивности излучения, что позволяет создать многофункциональную установку;

2. при проведении планирования был разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей. Были определены: общее количество календарных дней для выполнения работы – 95 дней, общее количество календарных дней, в течение которых работал инженер – 88 и общее количество календарных дней, в течение которых работал руководитель - 29;

3. составлен бюджет научного исследования, позволяющий оценить затраты на реализацию проекта, которые составляют 258827 рублей;

4. по факту оценки эффективности научного исследования, можно сделать следующие выводы:

- значение интегрального показателя ресурсоэффективности научного исследования составляет 4.2, когда показатели аналогов равны 2,6 и 3,4;

- значение интегрального показателя эффективности научного исследования составляет 4.2, когда показатели аналогов равны 2,6 и 3,4. Значит схема генерации излучения, реализованная в данном научном исследовании, является наиболее эффективной схемой генерации излучения;

7 Социальная ответственность

7.1 Введение

Тема диссертации: “Генерация монохроматического излучения в суб-ТГц диапазоне частот релятивистскими электронами в геометрии пролёта рядом с многопластинной мишенью”. Эта работа включает в себя следующие этапы:

- расчёт дисперсионных соотношений для случая генерации переходного (далее ПИ) и дифракционного (далее ДИ) излучений пучком релятивистских электронов для геометрии пролёта вблизи многопластинной призматической мишени;
- численное моделирование в модуле CST Microwave Studio программного пакета CST Studio Suite спектрально-углового распределения излучения реальных фотонов, продифрагированного с многопластинной призматической мишенью в диапазоне частот стендового излучателя, имеющегося в наличии лаборатории “Фотон”;
- численное моделирование в модуле CST Particle Studio программного пакета CST Studio Suite спектрально-угловых распределений ПИ и ДИ от многопластинной призматической мишени;
- проведение измерений на ГГц-м стендовым излучателем с использованием параболического телескопа и интерферометра Мартина-Паплетта;
- проведение экспериментов на выведенном пучке релятивистских электронов микротрона НИ ТПУ для экспериментального исследования спектрально-угловых распределений ДИ и ПИ от многопластинной призматической мишени;
- написание программного обеспечения для обработки экспериментальных данных на языке программирования Python 3.x;

- обработка и анализ полученных экспериментальных данных, а также сравнение с численным моделированием в CST Studio Suite;
- создание первичной аналитической модели в формализме метода обобщённых токов.

Научное исследование было проведено в Томском политехническом университете, ИШФВП, в лаборатории “Фотон”. Каждое из помещений лаборатории имеет площадь более 35 м². Рабочая зона включает в себя, в случае стендовых измерений и проведения экспериментов на выведенном пучке электронов, оптический стол с необходимыми расходными материалами, специальное оборудование: цилиндр Фарадея, интерферометр Мартина-Паплетта, параболический телескоп и детекторы миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн. Всё оборудование заземлено и находится пожаровзрывобезопасном, электробезопасном помещении с радиационной защитой. В соответствии с ГОСТ 12.1.005 – 88 постоянным рабочим местом является вся рабочая зона, так как работа осуществлялась в разных пунктах рабочей зоны. Численное моделирование производилось на стационарном ЭВМ в одном из помещений лаборатории “Фотон”.

Предполагается, что полученные результаты исследования позволят продвинуться в создании нового поколения источников ТГц излучения для нужд спектроскопии и дефектоскопии (данный список может быть расширен в зависимости от дальнейших результатов исследования). В связи с этим, в данном разделе рассмотрены вредные и опасные факторы, действующие на сотрудника лаборатории, разработаны требования безопасности и комплекс защитных мероприятий на рабочем месте. Также этот раздел включает подразделы охраны окружающей среды и чрезвычайных ситуаций.

7.2 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

7.2.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства

В соответствии с положением Трудового кодекса РФ 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019) нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю, однако для работников, занятых на работах с вредными условиями труда, устанавливается сокращенная продолжительность рабочего времени – не более 36 часов в неделю (статья 92), при этом для работников, занятых на работах с вредными и (или) опасными условиями труда, при 36-часовой рабочей неделе максимально допустимая продолжительность ежедневной смены не может превышать 8 часов. Также предоставляются ежегодные отпуска (статья 114) и ежегодные дополнительные оплачиваемые отпуска работникам, занятым на работах с вредными и (или) опасными условиями труда, минимально это 7 календарных дней (статья 117).

Размер минимальной заработной платы в субъекте Российской Федерации не может быть ниже минимального размера оплаты труда, установленного федеральным законом (статья 133), при этом, оплата труда работников, занятых на работах с вредными и (или) опасными условиями труда, производится в повышенном размере, минимальный размер повышения составляет 4% от установленного оклада (статья 147).

Работодатель обязан обеспечить нормальные условия для выполнения работниками норм выработки (статья 163). Работодатель обязан предоставить отпуск без сохранения заработной платы работникам, обучающимся по имеющим государственную аккредитацию программам бакалавриата, программам специалитета или программам магистратуры по очной форме обучения, совмещающим получение образования с работой, для прохождения промежуточной аттестации – 15 календарных дней в учебном году, для подготовки и защиты выпускной квалификационной работы и сдачи итоговых государственных экзаменов – четыре месяца, для сдачи итоговых государственных экзаменов – один месяц (статья 173). Более того, на работах с

вредными и (или) опасными условиями труда, работникам бесплатно выдается специальная одежда, специальная обувь и другие средства индивидуальной защиты, а также смывающие и (или) обезвреживающие средства в соответствии с типовыми нормами (статья 221).

7.2.2 Эргономические требования к рабочей зоне

Одним из факторов комфортности рабочей среды является организация рабочего места. Основная цель организации рабочего места – улучшение условий труда, достижение высококачественного и экономически эффективного выполнения производственного задания в установленные сроки, ГОСТ Р 56906-2016.

В соответствии с ГОСТ 12.2.033-78 высота рабочей поверхности при работе стоя для женщин составляет 990 мм, для мужчин 1060 мм, при работе сидя для женщин 700 мм, для мужчин 750 мм в соответствии с ГОСТ 12.2.032-78.

Размещение в лаборатории ПК должно соответствовать санитарным нормам СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Рациональная планировка рабочего места предусматривает порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства. Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости представлены на рисунке 1, где а – зона максимальной досягаемости рук; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке; в – зона легкой досягаемости ладони; г – оптимальное пространство для грубой ручной работы; д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы.

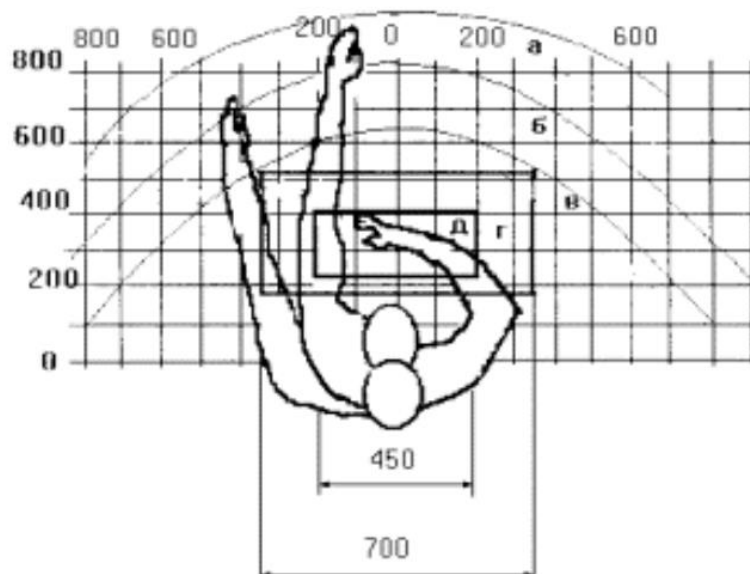


Рисунок 37 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук: дисплей размещается в зоне а (в центре); клавиатура – в зоне г/д; системный блок размещается в зоне б (слева); принтер находится в зоне а (справа); в зоне в (слева) литература и документация, необходимая при работе; в выдвижных ящиках стола – литература, не используемая постоянно.

При проектировании письменного стола необходимо, чтобы высота рабочей поверхности стола варьировалась в пределах 680-800 мм, высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Также необходимо, чтобы рабочий стол был шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм, должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420-550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать ширину и глубину поверхности сиденья с заглублённым передним краем не менее 400 мм.

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45° к нормали экрана. Также должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15°. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели.

При однообразной умственной работе, требующей значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, рекомендуется выбирать неяркие, малоконтрастные цветочные оттенки, которые не рассеивают внимание (малонасыщенные оттенки холодного зеленого или голубого цветов). При работе, требующей интенсивной умственной или физической напряженности, рекомендуются оттенки тёплых тонов, которые возбуждают активность человека.

7.3 Производственная безопасность

7.3.1 Профессиональная социальная безопасность

Согласно ГОСТ 12.1.005–88 работа инженера-исследователя по характеру физической нагрузки относится к разряду легких (категория I).

Выявление опасных и вредных производственных факторов на рабочем месте осуществляется с использованием «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» по ГОСТ 12.0.003-2015.

7.3.2 Анализ вредных и опасных факторов, создаваемых объектом исследования

Непосредственно сам объект исследования не обладает вредными и опасными факторами, так как это схема генерации излучения, но реализуется данная схема с использованием релятивистского пучка электронов, который является источником низкоэнергетического тормозного излучения (ионизирующего излучения). Все исследования производятся при удалённом управлении микротрона ТПУ на зоне, где радиационный фон равен естественному.

Лаборатория, в которой проводилась работа была подвергнута испытаниям в аккредитованной Госстандартом России лаборатории радиационного контроля по параметру: определение радиационной обстановки и соответствует нормативным требованиям, представленным в документах “Нормы радиационной безопасности” (НРБ-99/2009). СП 2.6.1.2523-09, “Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности” (ОСПОРБ-99/2010). СП 2.6.1.2612-10.

7.3.3 Анализ вредных и опасных факторов, возникающие в лаборатории при проведении исследований

В соответствии ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ вредные производственные факторы приводят к заболеванию или усугубляют уже имеющиеся заболевания, опасные производственные факторы приводят к травме, в том числе смертельной.

При выполнении работ в лаборатории на инженера-исследователя могут влиять следующие вредные и опасные факторы факторов представлен в таблице 29. Каждый фактор рассмотрен подробнее ниже.

Таблица 29 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработ ка	Изготовл ение	Эксплуат ация	
1.Повышенный уровень ионизирующих излучений в рабочей зоне			+	<ul style="list-style-type: none"> • Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009).СП 2.6.1.2523-09; • ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность • Пожаро- и взрывобезопасность промышленных объектов. ГОСТ Р12.1.004-91 ССБТ Пожарная безопасность; • СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Санитарноэпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы»; • СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95; • СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий;
2.Поражение электрическим током				
3.Пожарная безопасность				
4. Воздействие радиации (ВЧ, УВЧ, СВЧ и т.д.)				

Продолжение таблицы 29.

5. Недостаточная освещённость рабочей зоны	+	+	+	<ul style="list-style-type: none"> СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату помещений.
6. Отклонение показателей микроклимата в помещении	+	+	+	

7.3.4 Вредные факторы

7.3.4.1 Отклонение показателей микроклимата в помещении

Высокая температура воздуха способствует быстрой утомляемости работающего, может привести к перегреву организма, тепловому удару. Низкая температура воздуха может вызвать местное или общее охлаждение организма, стать причиной простуды, обморожению. Высокая относительная влажность при высокой температуре воздуха способствует перегреванию организма, при низкой температуре увеличивается теплоотдача с поверхности кожи, что ведет к переохлаждению.

Оптимальные и допустимые нормы микроклимата устанавливаются согласно ГОСТ 12.1.005-88, таблица 30.

Таблица 30 – Оптимальные и допустимые нормы микроклимата для протекания трудового процесса

Период года	Категория работ	Температура, °С		Скорость воздушных потоков, м/с		Относительная влажность, %	
		Оптимальная	Допустимая	Оптимальная	Допустимая	Оптимальная	Допустимая
Теплый	Легкая Iб	22-24	21-28	0,2	0,1-0,3	40-60	<60
Холодный		21-23	20-25	0,1	<0,2	40-60	<75

Согласно СанПиН 41-01-2003, в зданиях и сооружениях следует предусматривать обеспечение нормируемых метеорологических условий. Для улучшения воздухообмена в помещении необходимо:

- правильно размещать приточно-вытяжную вентиляцию;
- установить объем притока воздуха в помещение равным общему объему вытяжки.

Параметры микроклимата в помещении, где находится рабочее место, регулируются системой центрального отопления и приточно-вытяжной вентиляцией, и имеют следующие значения: влажность 45%, скорость движения воздуха 0,1 м/с, температура летом 21-24°C, зимой 18-21°C, что соответствует требованиям, представленных в таблице 30.

7.3.4.2 Недостаточная освещённость рабочей зоны

Недостаточная освещенность способствует возрастанию нагрузки на органы зрения, приводит к утомляемости организма, способствует развитию близорукости. В то время излишне яркий свет слепит, снижает зрительные функции, приводит к перевозбуждению нервной системы.

Естественное и искусственное освещение нормируется СП 52.13330.2011 и СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. В таблице 31 представлены требуемые показатели освещения помещения лаборатории.

Таблица 31 – Нормируемые показатели естественного, искусственного и совмещенного освещения

Помещение	Естественное освещение		Искусственное освещение				Совмещенное освещение	
	КЕО, %		Освещенность, лк			Коэф. Пульсации осв-ти, % не более	КЕО, %	
	При верх. или комб. освещ	При боковом освещ	При комб. освещении		При общем освещ		При верх. или комб. освещ	При боковом освещ
Лаборатория “Фотон”	3,5	1,2	Всего	От общего	400	10	2,1	0,7

7.3.4.3 Повышенный уровень ионизирующих излучений в рабочей зоне

В результате воздействия ионизирующих излучений на организм человека нарушается нормальное течение биохимических процессов и обмен веществ. В зависимости от величины поглощенной дозы излучения и от индивидуальных особенностей организма. Вызванные изменения могут быть обратимыми или необратимыми. Любой вид ионизирующего излучения вызывает биологические изменения в организме как при внешнем облучении, когда источник облучения находится вне организма, так и при внутреннем облучении, когда радиоактивные вещества попадают внутрь организма.

В ходе выполнения научного исследования эксперименты проводились на микротроне, генерирующем пучок электронов с энергиями до 6,1 МэВ. Согласно санитарно-эпидемиологическим правилам и нормативам «Гигиенические требования к устройству и эксплуатации рентгеновских кабинетов, аппаратов и проведению рентгенологических исследований» СанПиН 2.6.1.1192-03, данный вид ускорителей относится к I группе, то есть к группе ускорителей с максимальной энергией ускоренных электронов до 10 МэВ. При вышеуказанной энергии электронов фотоядерные реакции возможны лишь с отдельными изотопами и наведенная активность окружающей среды практически не представляет опасности для здоровья людей.

Радиационная защита от всех видов ионизирующего излучения, возникающего при работе ускорителя, должна проектироваться так, чтобы суммарные годовые эффективные дозы облучения персонала и населения не превышали величин 20 мЗв/год для персонала группы А, 5 мЗв/год для персонала группы Б и 1 мЗв/год для обычного населения. При этом следует учитывать максимальное время работы ускорителя в течение года и вводить коэффициент запаса, равный 2.

7.3.4.4 Воздействие радиации (ВЧ, УВЧ, СВЧ и т.д.)

Экран и системные блоки, периферийные устройства, стендовый ГГц излучатель производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока, видео-кабеля и стендового ГГц излучателя. Согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот 5-2000 Гц – 25 В/м;
- в диапазоне частот 2-400 кГц – 2,5 В/м;

Плотность магнитного потока:

- в диапазоне частот 5-2000 Гц – 250 нТл;
- в диапазоне частот 2-400 кГц – 250 нТл;

При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение 71 хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др. Доза облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкР/час. По СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность эквивалентной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана не более 100 мкР/час.

Стендовый ГГц излучатель, где рабочим элементом является диод Гана генерирует излучение низкой интенсивности. Документация на излучатель была затеряна, поэтому предполагается, что к иллучателю применяются нормы СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03.

7.3.5 Опасные факторы

7.3.5.1 Поражение электрическим током

Знание допустимых для человека значений тока и напряжения позволяет правильно оценить опасность поражения и определить требования к защитным мерам от поражения электрическим током.

ГОСТ 12.1.038-82 устанавливает предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов, протекающих через тело человека. Под напряжением прикосновения понимается напряжение между двумя точками цепи тока, которых одновременно касается человек. Нормы предназначены для проектирования способов и средств защиты от поражения электрическим током людей при их взаимодействии с электроустановками. Они соответствуют прохождению тока через тело человека по пути рука - рука или рука - ноги.

Стандарт предусматривает нормы для электроустановок при нормальном (неаварийном) режиме их работы, а также при аварийных режимах производственных и бытовых электроустановок.

Значения напряжения прикосновения и силы тока, протекающего через тело человека при нормальном (неаварийном) режиме работы электроустановки, не должны превышать значений, приведенных в таблице 31.

Таблица 32 – Предельно допустимые значения напряжения соприкосновения и силы тока

Род и частота тока	Наибольшие допустимые значения	
	$U_{\text{пр}}$, В	$I_{\text{пр}}$, мА
Переменный, 50 Гц	2	0,3
Переменный, 400 Гц	3	0,4
Постоянный	8	1,0

Для лиц, выполняющих работу в условиях высокой температуры и влажности (относительная влажность больше 75%), эти нормы должны быть уменьшены в 3 раза.

7.3.5.2 Пожарная безопасность

Согласно ГОСТ Р12.1.004-91, в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Так как помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины загорания:

- неисправность токоведущих частей установок;
- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документов, двери, столы, изоляция кабелей и т.п.

7.3.6 Мероприятия по защите от действия опасных и вредных факторов

7.3.6.1 Отклонение показателей микроклимата в помещении

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещение должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м³ на человека – не менее 30 м³ в час на человека; при объёме помещения более 40 м³ на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция.

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой 70 центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность – 40%, скорость движения воздуха – 0,1 м/с, температура летом составляет от 20 до 25°C, зимой – от 13 до 15°C. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери.

7.3.6.2 Недостаточная освещённость рабочей зоны

Согласно ГОСТ 12.4.011-89 к средствам нормализации освещения рабочих мест относятся дополнительные источники света, осветительные приборы, световые проемы, светозащитные устройства, светофильтры. Для общего освещения помещений лучше использовать люминесцентные лампы типа ЛБ, СП 52.13330.2011. Более того, учитывая, что солнечный свет оказывает благоприятное воздействие на организм человека, необходимо максимально продолжительно использовать естественное освещение. Для устранения слепящего действия солнечного света должны быть предусмотрены солнцезащитные приспособления (жалюзи, шторы, матовая окраска стекол).

7.3.6.3 Повышенный уровень ионизирующих излучений в рабочей зоне

При работе в радиационной лаборатории на ускорителе необходимо соблюдать ряд требований, которые перечислены ниже:

К работе на ускорителе допускаются лица не моложе 18 лет, не имеющие медицинских противопоказаний, отнесенные к категории персонала группы А или персонал группы Б в сопровождении персонала группы А, прошедшие обучение по правилам работы на ускорителе и по радиационной безопасности, прошедшие инструктаж по радиационной безопасности. Женщины должны освобождаться от работы на ускорителе, связанной с воздействием ионизирующих излучений, на весь период беременности и грудного вскармливания ребенка.

Данные ускорительные установки находятся в специальном бункере, конструкция радиационной защиты которых обеспечивает необходимую защиту персонала и населения в соответствии с документом СанПиН 2.6.1.26.12-10. Доступ лиц, не связанных непосредственно с работой на ускорителе должен быть регламентирован. Перед включением микротрона необходимо в срочном порядке покинуть бункер, после чего убедиться, что двери плотно закрыты и все условия удовлетворяют требованиям. Во время работы ускорителя на пульте управления и над входом в рабочую камеру в обязательном порядке горят предупреждающие световые сигналы.

Дополнительно необходимо использовать средства индивидуальной защиты (халат, шапочка, резиновые перчатки, тапочки), а также носить индивидуальный дозиметр в нагрудном кармане (для контроля дозы радиоактивного излучения, полученной персоналом при работе на ускорителе).

7.3.6.4 Воздействие радиации (ВЧ, УВЧ, СВЧ и т.д.)

При возможном превышении ПДУ возможны следующие меры защиты: увеличение расстояния между источником ЭМИ и рабочей зоной, установка отражающих или поглощающих экранов, размещение в специальных оболочках токоведущих элементов аппаратов и устройств.

7.3.6.5 Пожарная безопасность

Все помещения лаборатории должны соответствовать требованиям пожарной безопасности по ГОСТ 12.1.004-91. Лаборатория должна быть оснащена пожарными кранами с пожарными рукавами. В каждом рабочем помещении должны быть в наличии огнетушители и песок, а в помещениях с огнеопасными и легковоспламеняющимися веществами — дополнительные средства пожаротушения. Для предупреждения возникновения пожара, коротких замыканий, перегрузок и т.д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

- исключение образования горючей среды(герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

7.3.6.6 Поражение электрическим током

Основными мероприятиями по защите от поражения электрическим током являются:

- обеспечение недоступности токоведущих частей путём использования изоляции в корпусах оборудования;
- применение средств коллективной защиты от поражения электрическим током;
- использование защитного заземления, защитного зануления, защитного отключения (ГОСТ Р 12.1.019-2017);
- использование устройств бесперебойного питания;

Технические способы и средства применяют отдельно или в сочетании друг с другом так, чтобы обеспечивалась оптимальная защита.

Организационные мероприятия по электробезопасности являются периодические и внеплановые инструктажи. Периодический инструктаж проводится всему неэлектротехническому персоналу, выполняющему следующие работы: включение и отключение электроприборов, уборка помещений вблизи электрощитов, розеток и выключателей и т. д. Весь неэлектротехнический персонал должен быть аттестован на первую квалификационную группу по электробезопасности. Периодический инструктаж проводится не менее одного раза в год.

Внеплановый инструктаж проводится руководителем подразделения при введении в эксплуатацию нового технического электрооборудования.

Для обеспечения электробезопасности электроустановок происходит отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа. Также принимаются меры по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы, вывешивание плакатов, указывающих место работы, заземление корпусов всех установок через нулевой провод, покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией, недоступность токоведущих частей аппаратуры.

7.4 Экологическая безопасность

7.4.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду

Схема генерации когерентного ДИ в ТГц диапазоне частот при взаимодействии пучка релятивистских электронов с многопластинной мишенью позволяет теоретически получить импульс ТГц излучения порядка ГВт. В ТГц диапазоне частот лежат колебательные степени свободы сложных органических молекул, которые могут быть возбуждены ТГц излучением, но не ионизировать органическую молекулу.

Влияние ТГц излучения на органические молекулы может привести к нагреву и возгоранию вещества, но не к ионизации. В случае внешнего облучения человеческого организма ТГц излучением может возникнуть термический ожог кожного покрова высокой степени.

7.4.2 Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду

Согласно документу СанПиН 2.6.1.1192-03 при вышеуказанной энергии выведенных электронов микротрона фотоядерные реакции возможны лишь с отдельными изотопами и наведенная активность окружающей среды практически не представляет опасности для здоровья людей и окружающей среды.

Релятивистский пучок электронов энергией до 6,1 МэВ при взаимодействии с веществом радиационной защиты генерирует тормозное излучение низких энергий, которое полностью поглощается предусмотренной проектом бункера, в котором находится микротрон.

Стендовый ГГц излучатель по паспорту устройства обладает мощностью порядка 65 Вт в импульсе, что не приносит никакого вреда окружающей среде.

Мощность микротрона НИ ТПУ составляет 250 кВт при энергии выведенного пучка, равной 6,1 МэВ, что априорно является нересурсоэффективным и экологически не чистым с точки зрения потребления ресурсов. Повышенное потребление электроэнергии микротроном приводит к повышенному запросу выработки ГРЭС, ТЭЦ или АЭС, которые, в свою очередь, приводят к повышенному расходу природных ресурсов и увеличению количеству выбросов парниковых газов в атмосферу, ухудшению микроклимата, флоры и фауны географического пространства (в случае ГРЭС) или к увеличению количества отработанного ядерного топлива.

7.4.3 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды

Лаборатория находится в учебном корпусе НИ ТПУ, рядом на расстоянии сотен метров находятся другие учебные корпуса. Санитарно-защитная зона при проведении исследования должна составлять 100 метров в соответствии с СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03. А сам ускоритель находится в радиационно защищённом бункере.

В случае микротрона ТПУ необходимо произвести модернизацию СВЧ системы ускорителя, которая является центральным потребителем электроэнергии. Упомянутое улучшение позволит снизить потребление электроэнергии, следовательно снизить негативное влияние на окружающую среду.

7.5. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

7.5.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследования

Объект исследования (схема генерации ТГц излучения) находится в радиационно защищённом бункере и не инициирует ЧС, так как не является источником ионизирующего излучения.

7.5.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований

Из возможных природных (например, землетрясение), техногенных (например, обрушение здания, аварии, пожар и взрыв) и биолого-социальных (например, эпидемия) чрезвычайных ситуаций в лаборатории наиболее вероятной ЧС является пожар или взрыв, главными причинами возгорания которых могут являться:

- неисправность токоведущих частей микротрона(вакуумной системы, электрической системы, магнитной системы);
- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания СВЧ системы микротрона;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документов, двери, столы, изоляция кабелей и т.п.

7.5.3 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС

Все помещения лаборатории должны соответствовать требованиям пожарной безопасности по ГОСТ 12.1.004-91 и иметь средства пожаротушения по ГОСТ 12.4.009-83. К первичным средствам пожаротушения в лаборатории относятся порошковые огнетушители, сухой песок. В лаборатории есть порошковый огнетушитель ОП, ручной, объемом 5 л.

Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. Д. Необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);
- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения – предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);
- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;
- применение при строительстве и отделке зданий негорючих или трудно сгораемых материалов;
- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;
- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
- правильное размещение оборудования;
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

1. сообщить руководству (дежурному);
2. позвонить в соответствующую службу или МЧС;
3. принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

7.6 Список нормативных документов

1. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018).
2. ГОСТ Р 56906-2016 Бережливое производство. Организация рабочего пространства.
3. ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.
4. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 "Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы" (с изменениями на 21 июня 2016 года).
5. ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (с Изменением N 1).
6. СП 52.13330.2011 Естественное и искусственное освещение.
7. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 "Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов".
8. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95;
9. СП 52.13330.2011 Естественное и искусственное освещение.
10. НРБ-99/2009 Нормы радиационной безопасности. СП 2.6.1.2523-09
11. ОСПОРБ-99/2010. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности . СП 2.6.1.2612-10.

12. СанПиН 2.6.1.1192-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к устройству и эксплуатации рентгеновских кабинетов, аппаратов и проведению рентгенологических исследований».

13. ППБ 01-03. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации.

14. ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.

15. ГОСТ 12.4.009-83. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная техника для защиты объектов. Основные виды. Размещение и обслуживание.

7.7 Заключение по разделу “Социальная ответственность”

В результате выполнения раздела магистерской диссертации “Социальная ответственность” :

1. были рассмотрены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности;
2. проведён анализ опасных и вредных факторов, потенциально возможных при проведении исследования по теме магистерской диссертации, а также их влияние на физическое состояние исследователя;
3. проведён анализ влияния объекта исследования на окружающую среду;
4. проведён анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследования и обоснованы мероприятия по предотвращению ЧС, разработан порядок действий в случае возникновения ЧС.

Выводы

Результаты измерения спектрально-угловых распределений ИВЧ от тефлоновой призмы и ДИ от многослойной призмы демонстрируют, что:

1. измеренный спектр ИВЧ от тефлоновой призмы на выведенном пучке микротрона состоит из 2 спектральных линий, соответствующих 4 и 5 резонансам по трэину (см. таблицу 2). Спектральная интенсивность и FWHM спектральной линии 4 резонанса по трэину составляют $I = 9.39 \cdot 10^{-3}$ отн. ед. и $FWHM_{\text{эксп}} = 0.78$ ГГц, когда теоретически рассчитанная по формуле (1.42) равна $FWHM_{\text{теор}} = 0.78$ ГГц;

2. измеренный спектр ДИ от многослойной призмы на выведенном пучке микротрона состоит из 2 спектральных линий, соответствующих 4 и 8 резонансам по трэину (см. таблицу 2), совпадающие с 2 и 4 резонансами плоских волноводов многослойной мишени (см. формулы (1.38) и (1.39)). Спектральная интенсивность и FWHM спектральной линии 4 резонанса по трэину, совпадающий с 2 резонансом плоского волновода, составляют $I = 19.42 \cdot 10^{-3}$ отн. ед. и $FWHM_{\text{эксп}} = 0.68$ ГГц, когда теоретически рассчитанная по формуле (1.42) равна $FWHM_{\text{теор}} = 0.66$ ГГц;

3. равенство теоретически рассчитанных по формуле (1.42) и измеренных с использованием (см. рисунок 25 и рисунок 31) интерферометра Мартина-Папплетта, находящегося в наличии лаборатории “Фотон” НИ ТПУ, спектров ИВЧ от тефлоновой призмы и ДИ от многослойной призмы демонстрирует предельно достижимое разрешение спектральных измерений.

Результаты проведённого численного моделирования угловых распределений ДИ от многослойной призмы в программном пакете CST Studio Suite и эксперимента на выведенном пучке микротрона находятся в согласии в пределах ошибки измерения. В дальнейшем планируется рассмотреть модуляцию сгустка электронов электромагнитным полем излучения от многослойной призмы для нужд создания компактного ТГц лазера на свободных электронах.

Результаты исследования отклонения банчируемого релятивистского пучка электронов при транспортировке внутри диэлектрической гофрированной структуры, проведённые на линейном ускорителе КЕК-LUCX (КЕК, Япония, город Цукуба), демонстрируют, что:

1. для пучка электронов пикосекундной длительности, генерируемом при засветке фотокатода импульсом 4-й гармоники Nd:YAG лазера [31] зависимость позиции центра пучка относительно смещения структуры и величины поперечного размера пучка в горизонтальном направлении практически линейны в интервале от -2 до 2 мм. При смещении гофрированной структуры относительно центра пучка на 2 мм потери заряда составляют 20%. Позиция центра пучка и поперечный размер в горизонтальном направлении, до пролёта внутри гофрированной структуры, не зависят от величины начального заряда;

2. для пучка электронов фемтосекундной длительности, генерируемом при засветке фотокатода импульсом 3-й гармоники Ti:Sapphire лазера [31], не наблюдалось отклонения пучка электронов при смещении диэлектрической структуры относительно центра. Причина отсутствия эффекта отклонения пучка электронов объясняется малой величиной заряда пучка электронов, так как в сравнении со случаем генерации пучка засветкой фотокатода импульсом 4-й гармоники Nd:YAG лазером [31] заряд на 3 порядка меньше, что приводит к уменьшению величины напряжённости электрического поля резонансного ИВЧ от корругированной диэлектрической структуры на 3 порядка.

В дальнейшем, планируется повторить эксперимент со схемой генерации пучка электронов заветкой фотокатода ипульсом 4-й гармоники Nd:YAG лазера и дополнить имеющиеся экспериментальные данные измерениями зависимостей сигнала гамма детектора (см. рисунок 32а) от величины смещения структуры, также как показать переход от поляризационного механизма отклонения банчируемого пучка электронов [30] к электростатическому механизму [19].

Список публикаций студента

Публикации в рецензируемых научных изданиях, входящих в ядро РИНЦ):

1. Наumenко Г. А. , Потылицын А. П. , Шевелев М. В. , Шкитов Д. А. , Попов К. Е. , Вуколов А. В. Квазичеренковский механизм излучения релятивистских электронов, пролетающих вблизи многослойной призматической мишени // Письма в ЖЭТФ. - 2020 - Т. 111 - №. 5-6. - С. 295-299.
2. G. A. Naumenko, A. P. Potylitsyn, M. V. Shevelev, D. A. Shkitov, K. E. Popov, and A. A. Vukolov Quasi-Cherenkov Mechanism of Radiation from Relativistic Electrons Flying near a Multilayer Prism Target// JETP Letters, 2020, Vol. 111, No. 5, pp. 255-259.
3. Наumenко Г. А., Шевелёв М. В., и Попов К. Е. Униполярное черенковское и дифракционное излучение релятивистских электронов// Письма в ЭЧАЯ. – 2020 – 6 выпуск.(статья принята к публикации).

Список литературы

1. A.P. Potylitsyn – Transition radiation and diffraction radiation. Similarities and difference // Institute for Nuclear Physics, Tomsk Polytechnic University. — 1998. — P. 169-179.
2. M. V. Shevelev and A. S. Konkov, “Peculiarities of the Generation of Vavilov-Cherenkov Radiation Induced by a Charged Particle Moving Past a Dielectric Target”, Journal of Experimental and Theoretical Physics, 2014, Vol.118 No.4, pp. 501–511.
3. Monochromaticity of coherent Smith-Purcell radiation from finite size grating / A. Aryshev, A. Potylitsyn, G. Naumenko et al. // Physical Review Accelerators and Beams. 2017. Vol. 20, 024701pp.
4. С. П. Капица, В. Н. Мелехин, Микротрон, Изд-во Наука, М. (1969).
5. A. P. Potylitsyn, G. A. Naumenko, L. G. Naumenko, A. Aryshev, M. Shevelev, N. Terunuma, and J. Urakawa, “Observation of Subterahertz Monochromatic Transition Radiation from a Grating”, Journal of Experimental and Theoretical Physics, 2016, Vol.104, No. 11, pp. 826–830.
6. P. Henri, O. Haeberlé, P. Rullhusen, N. Maene, and W. Mondelaers, "Grating transition radiation: A source of quasimonochromatic radiation," Phys. Rev. E, vol. 60, p. 6214, 1999.
7. N. A. Vinokurov and Y. U. Jeong, “Generating high-power short terahertz electromagnetic pulses with a multifoil radiator,” Phys. Rev. Lett.**110**, 064805 (2013);
8. J. Jo, B. Gudkov, Y. U. Jeong, H. N. Kim, K. N. Kim, K. Lee, S. Miginsky, S. H. Park, W. J. Ryu, and N. Vinokurov, “High-power ultrashort terahertz pulses generated by a multi-foil radiator with laser-accelerated electron pulses,” in Proceedings of the 37th International Free Electron Laser Conference (FEL 2015): Daejeon, Korea, 23–28 August 2015 (JACoW,2015), p. WEP082.

9. Doucas G, Blackmore V, Ottewell, Perry C, Huggard P, Castro-Camus E, Johnston M, Lloyd Hughes J, Kimmitt M, Redlich B and Van der Meer A 2006 Phys. Rev. STAB 9 092801.
10. Aryshev A., Potylitsyn A.P., Naumenko G.A. et al. Observation of grating diffraction radiation at the KEK LUCX facility // Scientific Reports, Volume 10, Article number 7589 (2020).
11. Z. Wang, K. Yao, M. Chen, H. Chen, Y. Liu, "Manipulating Smith-Purcell Emission with Babinet Metasurfaces," Phys. Rev. Lett. , vol. 117, p. 157401, 2016;
12. D. Y. Sergeeva, A. A. Tishchenko и M. N. Strikhanov, «Microscopic theory of Smith-Purcell radiation from 2D photonic crystal,» Nuclear Instruments and Methods B, т. 402, p. 206, 2017.
13. I. Kaminer, S.E. Kooi, R. Shiloh, B. Zhen, Y. Shen, J.J. López, R. Remez, S.A. Skirlo, Y. Yang, J. D. Joannopoulos, A. Arie, and M. Soljačić, "Spectrally and Spatially Resolved Smith-Purcell Radiation in Plasmonic Crystals with Short-Range Disorder," *Phys. Rev. X* , vol. 7, p. 011003, 2017.
14. C. Roques-Carmes, S.E. Kooi, Y. Yang, A. Massuda, P.D. Keathley, A. Zaidi, Y. Yang, J.D. Joannopoulos, K.K. Berggren, I. Kaminer, and M. Soljačić, "Towards integrated tunable all-silicon free-electron light sources," *Nature Communications*, vol. 10, p. 3176, 2019
15. N. Sei and T. Takahashi, Sci. Rep. 7, 17440 (2017).
16. E. G. Krastelev, B. N. Yavlovkov, Technical Physics Letters 3(15), 775 (1977).
17. A. V. Agafonov, A. A. Kolomenskii, E. G. Krastelev, A. N. Lebedev, B. N. Yablokov, Transportation of high-current electron beams in vacuum dielectric channels, Fiz. Inst. Akad. Nauk (1978), Preprint.
18. K. Lekomtsev, A. Aryshev, A. A. Tishchenko et. al., Driver-witness electron beam acceleration in dielectric mm-scale capillaries. Physical Review accelerators and Beams. 21(5), 051301 (2018).

19. K.A. Vokhmyanina, A.A. Kaplii, A.S. Kubankin, V.S. Sotnikova, T.B. Nikulicheva, A.S. Chepurnov, The characteristics of the grazing interaction of fast electrons with dielectric surfaces Moscow University Physics Bulletin 72(1), 45-50 (2017).
20. Сивухин Д. В., Общий курс физики. Учеб. пособие: Для вузов. В 5т. Т.4. Оптика., М.: ФИЗМАТЛИТ; Изд-во МФТИ, 2005. – 560 с. – ISBN 5-9221-0225-7; 5-89155-078-4.
21. Дж. Джелли, Черенковское излучение и его применение, Изд-во иностр. Лит., М. 1960.
22. Схема доступа: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/4763>.
23. D. Y. Sergeeva, A. P. Potylitsyn, A. A. Tishechenko, and M. N. Strikhanov, Smith-Purcell radiation from periodic beams// Optics Express, Vol. 25, No. 21, 16 Oct 2017.
24. Г. А. Наumenко, А. П. Потылицын, П. В. Каратаев, М. А. Шипуля, В. В. Блеко, “Спектр когерентного переходного излучения, генерируемого модулированным электронным пучком ” // Письма в ЖЭТФ, 10 июня 2017 г.
25. Liang Chi Shen, Jin Au Kong, Applied Electromagnetism, PWS Engineering, Boston, Massachusetts, 1987.
26. D. H. Martin, E. Puplett, Polarised interferometric spectrometry for the millimetre and submillimeter spectrum, Infrared Physics, 10, 105, (1970).
27. Bell, R. Introductory Fourier Transform Spectroscopy (Elseiver 2012);
28. L. Frolich. DESY-thesis. 2015-11.
29. B. N. Kalinin, G. A. Naumenko, A. P. Potylitsyn, G. A. Saruev, L. G. Sukhikh, and V. A. Cha, “Measurement of the angular characteristics of transition radiation in Near and Far Zones”, Journal of Experimental and Theoretical Physics, Vol. 84, No. 3, pp.136-140.
30. K. Lekomtsev, A. Aryshev, A. A. Tishchenko, M. Shevelev, A. A. Ponomarenko, P. Karataev, N. Terunuma, J. Urakawa, Sub-THz radiation from dielectric capillaries with reflectors, NIM B 402 (2017) 148 – 152;

31. A. Aryshev, M. Shevelev, Y. Honda, N. Terunuma, and J. Urakawa, Femtosecond response time measurements of a Cs₂Te photocathode, Appl. Phys. Lett. 111, 033508 (2017);

Приложение А

```
import numpy as np
from scipy import optimize as sp
from scipy.fft import fft, fftfreq, fftshift
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
# _____
# _____
#Структура файла на LUCX
class Load(object):
    def __init__(self, file_path, skp_n, clm_n, lst_bkg):
        """ Конструктор """
        self.file_path = file_path
        self.skp_n = skp_n
        self.clm_n = clm_n
        self.lst_bkg = lst_bkg
        self.gen_dt = np.genfromtxt(self.file_path, skip_header = self.skp_n,
usecols = self.clm_n)

    def load_pst_ccd(self, path, int_row, n_clm, smb_int, smb_fn):
        """ Погрузка значений позиции для CCD_scan """
        f = open(path, "r")
        lines = f.readlines()[int_row:]
        for i in range(len(lines)):
            lines[i] = lines[i].split()[n_clm]
            lines[i] = float(re.search("smb_int(.*?)smb_fn", lines[i]).group(1))
        f.close()

    def load_bkg(self, str_nmb):
        """ Подгрузка фон тока, сигнал и аттенуаций ток, сигнала"""
        df = pd.read_csv(self.file_path, delimiter = "\t", skiprows = str_nmb,
usecols = self.lst_bkg, nrows = 0)
        self.sgn_bkg = float(list(df)[0])
        self.crt_bkg = float(list(df)[1])
        self.sgn_att = float(list(df)[2])
        self.crt_att = float(list(df)[3])
        return self.sgn_bkg, self.crt_bkg, self.sgn_att, self.crt_att

    def dt_avr(self, nshots):
        """ Усреднение сигнала, тока"""
```

```

        gen_dt = np.genfromtxt(self.file_path, skip_header = self.skp_n, usecols
= self.clm_n)
        avr_pst= np.mean(np.reshape(gen_dt[:,0], (int(len(gen_dt[:,0])/nshots),
nshots)), axis = 1)
        avr_sgn = np.mean(np.reshape(gen_dt[:,1], (int(len(gen_dt[:,1])/nshots),
nshots)), axis = 1)
        avr_crt = np.mean(np.reshape(gen_dt[:,2], (int(len(gen_dt[:,2])/nshots),
nshots)), axis = 1)
        """ Вычет фона и нормирование по току """
        for i in range(len(avr_crt)):
            avr_sgn[i] = ((10 ** (self.sgn_att / 20.))*(avr_sgn[i] -
self.sgn_bkg)) / ((10 ** (self.crt_att / 20.))*(avr_crt[i] - self.crt_bkg))
            self.avr_sgn = avr_sgn
            self.avr_pst = avr_pst
        return self.avr_pst, self.avr_sgn

class Data_treatment(Load):
    """ Пост обработка данных сигнал с интерферометра Майкельсона """
    def __init__(self, file_path, skp_n, clm_n, lst_bkg, a_init, b_init):
        Load.__init__(self, file_path, skp_n, clm_n, lst_bkg)
        self.a_init = a_init
        self.b_init = b_init

    # Определение аппроксимирующей функции
    def int_apr(self):
        def apr_fnc(x, a, b):
            return a*x + b
        # Произвожу аппроксимацию данных
        try:
            fit_params, fit_covariances = sp.curve_fit( apr_fnc,
self.avr_pst, self.avr_sgn, [self.a_init, self.b_init], maxfev=500)
        except RuntimeError:
            fit_params, fit_covariances = [1, np.mean(self.avr_sgn)], [[0,
0], [0, 0]]
        #Fit parameters
        [self.a, self.b] = fit_params
        # Errors of the fit params are square roots of the diagonal elements of
the covariance matrix.
        [self.a_err, self.b_err] =
[(fit_covariances[0][0])**0.5, (fit_covariances[1][1])**0.5]
        return self.a, self.b, self.a_err, self.b_err

```

```

# Вычитание из нормированной интерферограммы аппроксимационной функции
def apr_sbt(self):
    self.upg_sgn = self.avr_sgn - (self.a * self.avr_pst + self.b)
    return self.avr_pst, self.upg_sgn

#Симметризация интерферограммы от-но позиции равноплечия интерферометра и
апподизация гауссианой
def smt_crt(self, smt_pst, sgm_apd):
    step = np.abs(np.abs(self.avr_pst[0]) - np.abs(self.avr_pst[1]))
#determine step (mm)
    cut_pst = np.where(self.avr_pst == smt_pst)[0][0]# Определяю точку от-но
которой происходит обрезание интерферограммы
    self.sht_smt = np.append([(self.avr_pst[cut_pst : ] - smt_pst)[: 0 : -
1]], [(-1 * (self.avr_pst[cut_pst : ] - smt_pst))])
    gauss = np.exp(-np.power(self.sht_smt, 2.) / (2 * np.power(sgm_apd,
2.)))
    self.sgn_smt = np.append((self.upg_sgn[cut_pst : ])[: 0 : -1],
[self.upg_sgn[cut_pst : ]]) * gauss
    return self.sht_smt, self.sgn_smt

class DFT_tune(Data_treatment):
    """ Вычисление Обратного ДПФ по алгоритму спектроскопии"""
    def __init__(self, file_path, skp_n, clm_n, lst_bkg, a_init, b_init):
        Data_treatment.__init__(self, file_path, skp_n, clm_n, lst_bkg, a_init,
b_init)
    def Simple_DFT(self, zsgn_vls):
        step = np.abs(self.sht_smt[0] - self.sht_smt[1]) #determine step (mm)
        m = len(self.sht_smt)+2*zsgn_vls #length of the signal
        a = np.zeros(zsgn_vls)
        k = fftfreq(m,step) #frequency array with step
        frq = (299.79/2)*k #converting to THz and applying Michelson
interferometer correction
        frq = frq[range(int(int(m/2)+ 1))] #cutting one side frequency range
        ya_norm = np.append(np.append(a, self.sgn_smt),a)
        Y = abs(fft(ya_norm))*(2*step / (m * 2.997)) #discrete Fourier
        Y = Y[range(int(round(m/2)+ 1))]
        self.frq = frq
        self.Y = Y
        return self.frq, self.Y

```

```

#
# Структура файла Г. А. Науменко
""" Пишу классы подгрузки данных, предварительной обработки данных и взятия
Обратного ДПФ"""
class Load_GAN(object):
    def __init__(self, file_path, skp_n, clm_n, sgn_att):
        """ Конструктор """
        self.file_path = file_path
        self.skp_n = skp_n
        self.clm_n = clm_n
        self.sgn_att = sgn_att
        self.gen_dt = np.genfromtxt(self.file_path, delimiter = ",", skip_header
= self.skp_n, usecols = self.clm_n, encoding = "utf-8")

""" Пост обработка данных сигнала с интерферометра Майкельсона """
class Dt_trt(Load_GAN):
    def __init__(self, file_path, skp_n, clm_n, sgn_att, a_init, b_init):
        Load_GAN.__init__(self, file_path, skp_n, clm_n, sgn_att)
        self.a_init = a_init
        self.b_init = b_init

    # Нормирование сигнала на ток и переворот интерферограммы в случае " реверса
    "

    def avr_sgn(self):
        self.avr_pst = self.gen_dt[:, 0]
        self.avr_crt = self.gen_dt[:, 1]
        self.crt_err = self.gen_dt[:, 2]
        self.avr_sgn = self.gen_dt[:, 3]
        self.sgn_err = self.gen_dt[:, 4]

        # Косвенная ошибка нормировки
        kosv_err = []
        for i in range(len(self.avr_pst)):
            kosv_err.append((10 ** (self.sgn_att /
20.)) * (((self.avr_sgn[i] / (self.avr_crt[i]**2)) * self.crt_err[i])**2 +
(self.sgn_err[i] / self.avr_crt[i])**2)**0.5)
            self.kosv_err = kosv_err

        for i in range(len(self.gen_dt)):

```

```

        self.avr_sgn[i] = (((10 ** (self.sgn_att / 20.))*self.avr_sgn[i]) /
self.avr_crt[i])
        # Последним элементом в массиве возвращается косвенная ошибка нормировки
        return self.avr_pst, self.avr_sgn, self.sgn_err, self.avr_crt,
self.crt_err, self.kosv_err
    """
    # Определение ошибки определения нормированного сигнала
    def err_def(self):
        kosv_err = []
        for i in range(len(self.avr_pst)):

kosv_err.append((((self.avr_sgn[i]/(self.avr_crt[i]**2))*self.crt_err[i])**2 +
(self.sgn_err[i]/self.avr_crt[i])**2)**0.5)
        self.kosv_err = kosv_err
        return self.kosv_err
    """

    # Проверяю на наличие реверса
    def rvs_check(self, n):
        if n == 1:
            if self.avr_pst[0] > 100.0:
                self.avr_pst = np.flip(self.avr_pst)
                self.avr_sgn = np.flip(self.avr_sgn)
                self.sgn_err = np.flip(self.sgn_err)
                self.crt_err = np.flip(self.crt_err)
            elif n == 2:
                if self.avr_pst[0] < 100.0:
                    self.avr_pst = np.flip(self.avr_pst)
                    self.avr_sgn = np.flip(self.avr_sgn)
                    self.sgn_err = np.flip(self.sgn_err)
                    self.crt_err = np.flip(self.crt_err)

        return self.avr_pst, self.avr_sgn

    # Поворот и отсечка от-но точки пересечения пучком параболического зеркала
    """ Добавь проверку нижний предел поиска минимума и верхний предел поиска
максимума"""
    def orient_set(self, pst_int, pst_fin, cnd):
        self.avr_pst = np.flip(self.avr_pst)
        if cnd == 1:
            self.ct_pnt = np.min(self.avr_sgn[pst_int : pst_fin])
            self.ct_ind = np.where(self.avr_sgn == self.ct_pnt)[0][0]

```

```

elif cnd == 2:
    self.ct_pnt = np.max(self.avr_sgn[pst_int : pst_fin])
    self.ct_ind = np.where(self.avr_sgn == self.ct_pnt)[0][0]
    self.ct_vls = self.avr_pst[self.ct_ind]
    for i in range(len(self.avr_pst)):
        self.avr_pst[i] = self.avr_pst[i] - self.ct_vls
    return self.avr_pst, self.avr_sgn

# Произвожу аппроксимацию данных
def int_apr(self):
    def apr_fnc(x, a, b):
        return a*x + b

    try:
        fit_params, fit_covariances = sp.curve_fit( apr_fnc,
self.avr_pst, self.avr_sgn, [self.a_init, self.b_init], maxfev=500)
    except RuntimeError:
        fit_params, fit_covariances = [1, np.mean(self.avr_sgn)], [[0,
0], [0, 0]]
    #Fit parameters
    [self.a, self.b] = fit_params
    # Errors of the fit params are square roots of the diagonal elements of
the covariance matrix.
    [self.a_err, self.b_err] =
[(fit_covariances[0][0])**0.5, (fit_covariances[1][1])**0.5]
    return self.a, self.b, self.a_err, self.b_err

# Вычитание из нормированной интерферограммы аппроксимационной функции
def apr_sbt(self, n):
    if n == 1:
        self.upg_sgn = self.avr_sgn - (self.a * self.avr_pst + self.b)
    elif n == 2:
        self.upg_sgn = self.avr_sgn - np.mean(self.avr_sgn)
    return self.avr_pst, self.upg_sgn

# Обрезание интерферограммы от-но позиции равноплечия
def smt_pnt_check(self, pt_smt_1, pt_smt_2):
    cut_vl = 34.00
    for i in range(len(self.avr_pst)):
        if self.avr_pst[i] > pt_smt_1 and self.avr_pst[i] < pt_smt_2:

```



```

        cut_vl = self.avr_pst[i]
        self.cut_vl = cut_vl
        self.cut_pst = np.where(self.avr_pst == self.cut_vl)[0][0]
        #Симметризация интерферограммы от-но позиции равноплечия интерферометра и
        апподизация гауссианой
        """ Ввести условие на проведение симметризации интерферограммы"""
        def smt_crt(self, sgm_apd):
            self.sht_smt = np.append([(-1 * ((self.avr_pst[self.cut_pst : ] -
            (self.cut_vl))))[: -1]], [ (self.avr_pst[self.cut_pst : ] - self.cut_vl)[1 : ]])
            gauss = np.exp(-np.power(self.sht_smt, 2.) / (2 * np.power(sgm_apd,
            2.)))
            self.sgn_smt = np.append([(self.upg_sgn[self.cut_pst : ])[ : -1]],
            [(self.upg_sgn[self.cut_pst : ])[1 : ]]) * gauss
            return self.sht_smt, self.sgn_smt

# Обратное ДПФ для симметризованной интерферограммы
class DFT_tune_GAN(Dt_trt):
    def __init__(self, file_path, skp_n, clm_n, sgn_att, a_init, b_init):
        Dt_trt.__init__(self, file_path, skp_n, clm_n, sgn_att, a_init, b_init)
    def Simple_DFT(self, zsgn_vls):
        step = np.abs(self.sht_smt[0] - self.sht_smt[1]) #determine step (mm)
        m = len(self.sht_smt)+2*zsgn_vls #length of the signal
        a = np.zeros(zsgn_vls)
        k = fftfreq(m,step) #frequency array with step
        frq = (299.79/2)*k #converting to THz and applying Michelson
        interferometer correction
        frq = frq[range(int(int(m/2)+ 1))] #cutting one side frequency range
        ya_norm = np.append(np.append(a, self.sgn_smt),a)
        Y = abs(fft(ya_norm))*(2*step / (m * 2.997)) #discrete Fourier
        Y = Y[range(int(round(m/2)+ 1))]
        self.frq = frq
        self.Y = Y
        return self.frq, self.Y

#

```

```

# Отдельный родительский класс для аппроксимации данных спектра

class SP_Apr(object):
    def __init__(self, dt_X, dt_Y):
        self.dt_X = dt_X

```

```

self.dt_Y = dt_Y

def I_peak( self, Amp_init, Mean_init, Sigma_init, Fon_init):
    def one_gauss(x, Amp, Mean, Sigma, Fon):
        return Amp*np.exp((- (x - Mean) ** 2) / (2 * (Sigma ** 2))) + Fon
    # Произвожу аппроксимацию данных
    try:
        fit_params, fit_covariances = sp.curve_fit( one_gauss,
self.dt_X, self.dt_Y, [Amp_init, Mean_init, Sigma_init, Fon_init], maxfev=500)
    except RuntimeError:
        fit_params, fit_covariances = [ 1, 0, 0,
np.mean(self.avr_sgn)], [[0, 0, 0, 0], [0, 0, 0, 0], [0, 0, 0, 0], [0, 0, 0, 0]]
    #Fit parameters
    [self.Amp, self.Mean, self.Sigma, self.Fon] = fit_params
    # Errors of the fit params are square roots of the diagonal elements of
the covariance matrix.
    [self.Amp_err, self.Mean_err, self.Sigma_err, self.Fon_err] =
[(fit_covariances[0][0])**0.5, (fit_covariances[1][1])**0.5,
(fit_covariances[2][2])**0.5, (fit_covariances[3][3])**0.5]
    return self.Amp, self.Mean, self.Sigma, self.Fon, self.Amp_err,
self.Mean_err, self.Sigma_err, self.Fon_err

def II_peaks(self, Amp_init, Mean_init, Sigma_init, Amp_init1, Mean_init1,
Sigma_init1, Fon_init):
    def two_gauss(x, Amp, Mean, Sigma, Amp1, Mean1, Sigma1, Fon):
        return Amp*np.exp((- (x - Mean) ** 2) / (2 * (Sigma ** 2))) +
Amp1*np.exp((- (x - Mean1) ** 2) / 2*(Sigma1**2))+ Fon
    try:
        fit_params, fit_covariances = sp.curve_fit( two_gauss,
self.dt_X, self.dt_Y, [Amp_init, Mean_init, Sigma_init, Amp_init1, Mean_init1,
Sigma_init1, Fon_init], maxfev=500)
    except RuntimeError:
        fit_params, fit_covariances = [ 1, 0, 0, 1, 0, 0,
np.mean(self.avr_sgn)], [[0, 0, 0, 0], [0, 0, 0, 0], [0, 0, 0, 0], [0, 0, 0, 0],
[0, 0, 0, 0], [0, 0, 0, 0], [0, 0, 0, 0]]
    #Fit parameters
    [self.Amp, self.Mean, self.Sigma, self.Amp1, self.Mean1, self.Sigma1,
self.Fon] = fit_params
    # Errors of the fit params are square roots of the diagonal elements of
the covariance matrix.
    [self.Amp_err, self.Mean_err, self.Sigma_err, self.Amp1_err,
self.Mean1_err, self.Sigma1_err, self.Fon_err] =

```

```

[(fit_covariances[0][0])**0.5, (fit_covariances[1][1])**0.5,
(fit_covariances[2][2])**0.5, (fit_covariances[3][3])**0.5,
(fit_covariances[4][4])**0.5, (fit_covariances[5][5])**0.5,
(fit_covariances[6][6])**0.5]

    return self.Amp, self.Mean, self.Sigma, self.Ampl, self.Meanl,
self.Signal, self.Fon, self.Amp_err, self.Mean_err, self.Sigma_err,
self.Ampl_err, self.Meanl_err, self.Signal_err, self.Fon_err
""" Здесь начинаю писать простые функции для различного рода аппроксимации """
def one_gauss(x, Amp, Mean, Sigma, Incl, Fon):
    return Amp*np.exp((- (x - Mean) ** 2) / (2 * (Sigma ** 2))) + Incl*x + Fon

def I_peak( dt_X, dt_Y, Amp_init, Mean_init, Sigma_init, Incl_init, Fon_init):
    # Произвожу аппроксимацию данных
    try:
        fit_params, fit_covariances = sp.curve_fit( one_gauss, dt_X, dt_Y,
[Amp_init, Mean_init, Sigma_init, Incl_init, Fon_init], maxfev=500)
    except RuntimeError:
        fit_params, fit_covariances = [ 1, 0, 0, 0, np.mean(dt_Y)], [[0, 0,
0, 0, 0], [0, 0, 0, 0, 0], [0, 0, 0, 0, 0], [0, 0, 0, 0, 0]]
        #Fit parameters
        [Amp, Mean, Sigma, Incl, Fon] = fit_params
        # Errors of the fit params are square roots of the diagonal elements of the
covariance matrix.
        [Amp_err, Mean_err, Sigma_err, Incl_err, Fon_err] =
[(fit_covariances[0][0])**0.5, (fit_covariances[1][1])**0.5,
(fit_covariances[2][2])**0.5, (fit_covariances[3][3])**0.5,
(fit_covariances[4][4])**0.5]
        return Amp, Mean, Sigma, Incl, Fon, Amp_err, Mean_err, Sigma_err, Incl_err,
Fon_err

def one_gauss_smp(x, Amp, Mean, Sigma, Fon):
    return Amp*np.exp((- (x - Mean) ** 2) / (2 * (Sigma ** 2))) + Fon

""" Простой гаусс - без наклона """
def I_peak_smp( dt_X, dt_Y, Amp_init, Mean_init, Sigma_init, Fon_init):
    # Произвожу аппроксимацию данных
    try:
        fit_params, fit_covariances = sp.curve_fit( one_gauss_smp, dt_X,
dt_Y, [Amp_init, Mean_init, Sigma_init, Fon_init], maxfev=500)
    except RuntimeError:
        fit_params, fit_covariances = [ 1, 0, 0, np.mean(dt_Y)], [[0, 0, 0,
0], [0, 0, 0, 0], [0, 0, 0, 0], [0, 0, 0, 0]]

```

```

    #Fit parameters
    [Amp, Mean, Sigma, Fon] = fit_params

    # Errors of the fit params are square roots of the diagonal elements of the
    covariance matrix.
    [Amp_err, Mean_err, Sigma_err, Fon_err] =
[(fit_covariances[0][0])**0.5, (fit_covariances[1][1])**0.5,
(fit_covariances[2][2])**0.5, (fit_covariances[3][3])**0.5]
    return Amp, Mean, Sigma, Fon, Amp_err, Mean_err, Sigma_err, Fon_err

""" Гаусс с фиксированным фоном """
def gauss_fixFon(x, Amp, Mean, Sigma):
    return Amp*np.exp(-((x-Mean)**2)/(2*Sigma**2))

def gauss_FxFon(X, Y, Amp_init, Mean_init, Sigma_init):

    try:
        fit_params, fit_covariances =
sp.curve_fit(gauss_fixFon, X, Y, [Amp_init, Mean_init, Sigma_init], maxfev=500)
    except RuntimeError:
        fit_params, fit_covariances =
[1,0,0], [[0,0,0], [0,0,0], [0,0,0], [0,0,0], [0,0,0], [0,0,0], [0,0,0]]

    #Fit parameters
    [Amp, Mean, Sigma] = fit_params

    # Errors of the fit params are square roots of the diagonal elements of
    the covariance matrix.
    [Amp_err, Mean_err, Sigma_err] =
[(fit_covariances[0][0])**0.5, (fit_covariances[1][1])**0.5, (fit_covariances[2][2]
)]**0.5]

    return Amp, Mean, Sigma, Amp_err, Mean_err, Sigma_err
#
#
#
# Построение графиков входных данных
class Data_plot(object):
    def __init__(self, dt_Int, dt_SpcInt):
        self.dt_IntPst = dt_Int[0]
        self.dt_IntAvt = dt_Int[1]
        self.dt_freq = dt_SpcInt[0]
        self.dt_SpcInt = dt_SpcInt[1]

```

```

def two_gauss_plt(self, x, Amp, Mean, Sigma, Amp1, Mean1, Sigma1, Fon):
    """ Функции для построения аппроксимационной кривой 2-гаусса """
    return Amp*np.exp((- (x - Mean) ** 2) / (2 * (Sigma ** 2))) +
    Amp1*np.exp((- (x - Mean1) ** 2) / 2*(Sigma1**2))+ Fon

def one_gauss(self, x, Amp, Mean, Sigma, Fon):
    """ Функции для построения аппроксимационной кривой 1-гаусса """
    return Amp*np.exp((- (x - Mean) ** 2) / (2 * (Sigma ** 2))) + Fon

def check_plt(self, dt_X, dt_Y, axsX_nm, axsY_nm):
    """ Построение одного графика для визуальной проверки данных """
    plt.plot(dt_X, dt_Y)
    plt.ylim(1.2 * np.min(dt_Y), 1.2 * np.max(dt_Y))
    plt.ylabel(axsY_nm)
    plt.xlabel(axsX_nm)
    plt.minorticks_on()
    plt.grid(b = True, which = 'major', color='#666666', linestyle = '--')
    plt.savefig()
    plt.show()

def set_plt(self, dt_KrPst, dt_KrInt, name):
    """ Построение полного набора данных """
    plt.subplot(2, 1, 1)
    plt.plot(dt_KrPst, dt_KrInt)
    plt.ylim(1.2 * np.min(dt_KrInt), 1.2 * np.max(dt_KrInt))
    plt.ylabel("Инт-ть, отн. ед.")
    plt.xlabel("Ориент. угол, град.")
    plt.minorticks_on()
    plt.grid(b = True, which = 'major', color='#666666', linestyle = '--')

    plt.subplot(2, 1, 2)
    plt.plot(self.dt_IntPst, self.dt_IntAvt)
    plt.ylim(1.2 * np.min(self.dt_IntAvt), 1.2 * np.max(self.dt_IntAvt))
    plt.ylabel("Инт-ть, отн. ед.")
    plt.xlabel("Разница хода, мм")
    plt.minorticks_on()
    plt.grid(b = True, which = 'major', color='#666666', linestyle = '--')

    plt.subplot(2, 1, 3)
    plt.plot(self.dt_freq, self.dt_SpcInt)
    plt.ylim(0., 1.2 * np.max(self.dt_SpcInt))

```

```

plt.ylabel("Инт-ть, отн. ед.")
plt.xlabel("Частота, ГГц")
plt.minorticks_on()
plt.grid(b = True, which = 'major', color='#666666', linestyle = '--')
plt.tight_layout()
plt.savefig(name)
plt.show()

def dep_evl(self, dt_1, dt_2, dt_3, dt_4, dt_5, x_name, y_name):
    """ Построение эволюции заданной физической величины от определённого
параметра """
    plt.plot( dt_1[0], dt_1[1], label = "Угол п-та 1")
    plt.plot( dt_2[0], dt_2[1], label = "Угол п-та 2")
    plt.plot( dt_3[0], dt_3[1], label = "Угол п-та 3")
    plt.plot( dt_4[0], dt_4[1], label = "Угол п-та 4")
    plt.plot( dt_5[0], dt_5[1], label = "Угол п-та 5")
    plt.xlabel( x_name)
    plt.ylabel( y_name)
    plt.legend(loc = "upper right")
    plt.savefig()
    plt.show()

```

Приложение Б

```
import scipy
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import re

nshots = 10

""" Подгрузка значений позиции для CCD_scan """

def load_pst_ccd(file_path, int_row, n_clm, smb_int, smb_fn):

    f = open(file_path, "r")
    lines = f.readlines()[int_row:]
    for i in range(len(lines)):
        lines[i] = lines[i].split()[n_clm]
        lines[i] = float(re.search(smb_int+"(.*)" +smb_fn, lines[i]).group(1))
    f.close()
    return lines

# pst_rs = np.reshape(pst_dat, ((len(pst_dat)/nshots), nshots))
""" Подгрузка данных аппроксимации из файла"""
"""
6 - mean of X position
8 - sigma of X
16 - mean of Y position
18 - sigma of Y
27 - value of FCT
28 - value of Gamma
"""

def load_raw_data(file_path, skip_raw , clm_lst):

    raw_data = np.genfromtxt(file_path, delimiter = "\t", skip_header = skip_raw,
    usecols = clm_lst)
    return raw_data

""" Усреднение входящих данных """

def Aver_simple(pst_dat, raw_data, nshots):
```

```

# Reshape входящих данных для передачи в функцию усреднения
pst_rs = np.reshape(pst_dat, (int(len(pst_dat)/nshots), nshots))

mean_X_rs = np.reshape(raw_data[:, 0], (int(len(raw_data[:, 0])/nshots),
nshots))
sigma_X_rs = np.reshape(raw_data[:, 1], (int(len(raw_data[:,
1])/nshots), nshots))

mean_Y_rs = np.reshape(raw_data[:, 2], (int(len(raw_data[:, 2])/nshots),
nshots))
sigma_Y_rs = np.reshape(raw_data[:, 3], (int(len(raw_data[:,
3])/nshots), nshots))

FCT_rs = np.reshape(raw_data[:, 4], (int(len(raw_data[:, 4])/nshots),
nshots))
Gamma_rs = np.reshape(raw_data[:, 5], (int(len(raw_data[:, 5])/nshots),
nshots))

# Средние значения преобразованных данных
pst = np.mean(pst_rs, axis = 1)

mean_X = np.mean(mean_X_rs, axis=1)
sigma_X = np.mean(sigma_X_rs, axis=1)

mean_Y = np.mean(mean_Y_rs, axis=1)
sigma_Y = np.mean(sigma_Y_rs, axis=1)

FCT = np.mean(FCT_rs, axis=1)
Gamma = np.mean(Gamma_rs, axis=1)

# Ошибки измерений преобразованных значений
mean_x_std = np.std(mean_X_rs, axis=1)*2.26# *2.26 это коэффициент
Стьюдента для 10 измерений при доверительном интервале 95%
sigma_X_std = np.std(sigma_X_rs, axis=1)*2.26

mean_Y_std = np.std(mean_Y_rs, axis=1)*2.26
sigma_Y_std = np.std(sigma_Y_rs, axis=1)*2.26

FCT_std = np.std(FCT_rs, axis=1)*2.26
Gamma_std = np.std(Gamma_rs, axis=1)*2.26

```



```
        return pst, mean_X, sigma_X, mean_Y, sigma_Y, FCT, Gamma, mean_x_std,
sigma_X_std, mean_Y_std, sigma_Y_std, FCT_std, Gamma_std

def dat_norm(data, cut_vls, norm_vls):
    for i in range(len(data)):
        data[i] = (data[i] - cut_vls)/norm_vls
    return data
```

Приложение С

Раздел
Введение
Раздел 1
Обзор литературы
Раздел 2
Теоретическая часть

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM84	Попов Константин Евгеньевич		15.05.2020

Консультант школы отделения (НОЦ) ОЯТЦИЯТШ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Веригин Д. А.	к.ф.-м.н.		15.05.2020

Консультант – лингвист отделения (НОЦ) школы ОИЯ ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Смирнова У. А.	-		15.05.2020

Introduction

The purpose of this master thesis is experimental verification of diffraction radiation intensity's spectral – angular distribution generated by bunched electron beam Coulomb field interacted with a multilayer conductive prism. Master thesis was carried out on National research Tomsk polytechnic university microtron accelerator (microtron hereafter). Also, numerical simulation in CST Studio Suite software will be presented in this thesis. There are 10 necessary tasks to complete master thesis research successfully:

1. Literature overview of experimental and theoretical papers of master thesis research area;
2. Dispersion equation calculation of diffraction radiation for multilayer prism generation geometry and Cherenkov radiation for teflon prism generation geometry;
3. Software coding to analyze experimental data on Python 3.x programming language;
4. Numerical modeling in CST Studio Suite software;
5. Calculation of necessary conditions to carry out experiment on the microtron;
6. To carry out experiment on test bench;
7. Preparation of necessary equipment to carry out experiment on the microtron;
8. To carry out experiment on the microtron;
9. Experiment data analyze;
10. Verification of experiment data coincidence with numerical modeling;
11. To formulate results.

In addition, a perspective is to provide numerical simulation of the electron beam longitudinal modulation by pulses of diffraction radiation from multilayer conductive prism. The longitudinally modulated beam generation is a novel technique to create compact THz free electron laser and passive dielectric deflecting cavities.

1 Literature overview

Polarized radiation generated by Coulomb field of a moving charge particle in the vicinity of grating or periodic target (named as Smith-Purcell radiation or SPR [1]) is well-studied. Scientists and engineers implement SPR to design a single-shot longitudinal bunch profile monitor [9] and a tunable intense source of monochromatic THz radiation [3]. Resonance transition radiation and resonance diffraction radiation (named as “GTR” and “GDR” hereafter), generated while the charge particle intersects or moving near grating, are studied theoretically and experimentally in papers [5, 10]. GDR and GTR can be applied to create tunable THz radiation source. The main advantage of GDR is a central frequency fine-tuning by changing the grating orientation angle [5]. Spectral line monochromaticity increases with diffraction order growing. Moreover, GDR is a non-invasive way to generate THz radiation [10]. To sum up, GDR is the most advantageous source of THz radiation, when target has periodicity along one dimension.

Polarized radiation from periodic target is a growing research area in case of metasurfaces (two dimensional targets or 2D targets), photonic and plasmonic crystals [11, 12] and multilayer targets of different shapes [7, 8]. The additional dimension of target excites additional resonances. Additional resonances cause the enhancement of spectrum monochromaticity, GW level power peak, longitudinal modulation of bunch [7], tunability of radiation spectrum density. There are many numerical simulations of effective control of THz radiation spectral-angular characteristics yield [11, 12], but there are few experimental works [13, 14] and theory is practically undeveloped still. Furthermore, there are only one theoretical and experimental paper [7, 8], where authors investigated coherent transition radiation produced by short relativistic electron bunch while it intersects conical multilayer conductive target.

However, results of paper [8] did not demonstrate the GW level power peak of THz radiation. Moreover, coherent Cherenkov radiation generated by Coulomb field of electron bunch moving near dielectric prism [2] or through corrugated dielectric channel [15] is considered as THz radiation source.

3D periodic structures (3D structures hereafter) can be used to design passive dielectric deflecting cavities [16-17] and accelerating cavities (this type of acceleration is named as “Dielectric Wakefield Acceleration” or “DWA”) [18] of relativistic electron bunches. Transportation of nonrelativistic high-current continuous electron and ion bunches is mostly investigated experimentally, however there is only one experiment carried out with bunched electron beam [16]. It is transportation through dielectric channel of high current continuous and bunched electron beam with energy at 350-800 keV and current at 20 kA. At the entrance of the channel, the electron beam disintegrates under the influence of space charge forces and the channel walls are charged. As a result of surface breakdown, a plasma layer is formed near the wall. The field of the space charge of the beam draws ions from the plasma and accelerates it toward the channel longitudinal axes. In the experiments [19] 10 keV continuous electron beam with 1kA current deflected while moving near dielectric plate and corrugated structure (Smith-Purcell grating). Reason of deflection was indicated as some self-consistent charge distribution formation on the dielectric surface.

2 Theoretical part

2.1 Dispersion equation of DR generation in case of multilayer prismatic target geometry

Diffraction radiation, generated by a charge particle moving in the vicinity of periodic structure, is detected in the angles predicted by dispersion equation. Dispersion equation is the function of target period, layer length gradient, radiation wavelength and particle energy.

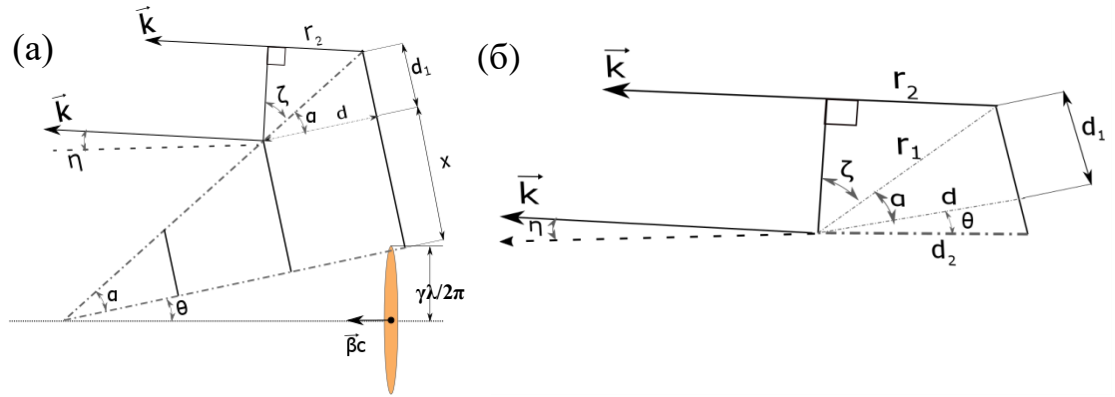


Figure 1 – To the peculiarity of dispersion equation derivation: (a) – geometry of DR generation in case of multilayer prismatic target, (b) – to the peculiarities of dispersion equation

The derivation of the dispersion equation is based on the construction interference condition (Huygens principle), when difference optical paths is equal to an integer number of radiation wavelength [20]:

$$\Delta = \pm k \cdot \lambda, \quad (1.1)$$

where k is the diffraction order, λ is the radiation wavelength.

$$\Delta = L_1 - L_2, \quad (1.2)$$

where L_1 is the first ray optical path, L_2 is the second ray optical path.

$$L_1 = d_1 + x + r_2 \quad (1.3)$$

$$L_2 = d_2 + x \quad (1.4)$$

$$d_2 = \frac{d}{\cos(\theta)}, \quad (1.5)$$

where d is the target period, θ is the target orientation angle.

$$d_1 = d \cdot \operatorname{tg}(\alpha), \quad (1.6)$$

where α is the apex angle of prism.

$$L_1 - L_2 = \frac{d \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}{\vartheta} + r_2 - \frac{d}{\beta \cdot \cos(\theta)}, \quad (1.7)$$

where β is the particle velocity in light units.

$$\alpha + \theta + \zeta + \eta + \pi/2 = \pi, \quad (1.8)$$

where η is the observation angle.

$$r_2 = r_1 \cdot \cos(\alpha + \theta + \eta) \quad (1.9)$$

$$r_2 = d \cdot \frac{\cos(\alpha + \theta + \eta)}{\cos(\alpha)} \quad (1.10)$$

$$\frac{d \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}{\vartheta} + d \cdot \frac{\cos(\alpha + \theta + \eta)}{\cos(\alpha)} - \frac{d}{\beta \cdot \cos(\theta)} = \pm k \cdot \lambda \quad (1.11)$$

$$\lambda = \pm \frac{d}{k} \cdot \left(\frac{\operatorname{tg}(\alpha)}{\vartheta} + \frac{\cos(\alpha + \theta + \eta)}{\cos(\alpha)} - \frac{1}{\beta \cdot \cos(\theta)} \right) \quad (1.12)$$

$$\eta = \arccos \left(\cos(\alpha) \cdot \left\{ \pm \frac{k \cdot \lambda}{d} - \frac{\operatorname{tg}(\alpha)}{\vartheta} + \frac{1}{\beta \cdot \cos(\theta)} \right\} \right) - (\alpha + \theta) \quad (1.13a)$$

Additional verification of dispersion equation derivation was provided by separate derivation of dispersion equation for case when charge particle moves parallel to the multilayer target, as well as calculation of generalized dispersion equation for inclination angle $\theta = 0^\circ$.

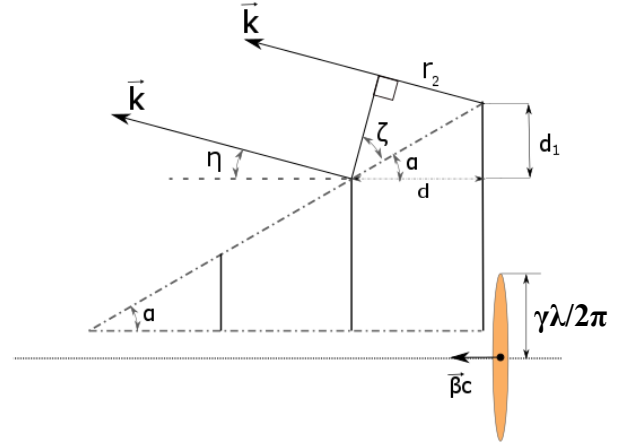
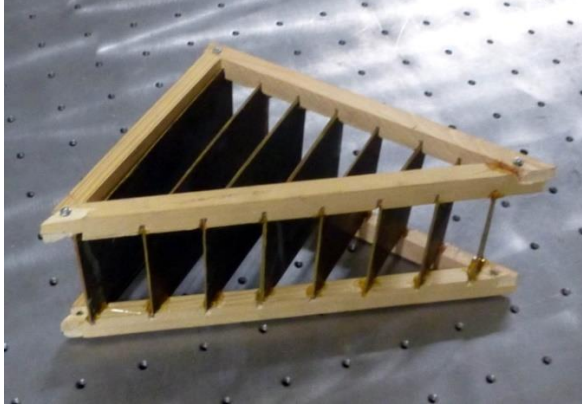


Figure 2 – DR generation scheme in parallel geometry

$$\eta = \arccos \left(\cos(\alpha) \cdot \left\{ \pm \frac{k \cdot \lambda}{d} - \frac{tg(\alpha)}{\vartheta} + \frac{1}{\beta} \right\} \right) - \alpha \quad (1.14)$$

Parameters of multilayer prism used in experiments on the microtron are followings: material is the fiberglass, layer thickness Δd is equal to 1mm, apex angle of prism α is equal to 38.1 degree, length of leg L is equal to 185 mm, height H is equal to 85 mm, period d is equal to 27 mm.

2.2 Cherenkov radiation spectral - angular distribution

2.2.1 Cherenkov radiation angular distribution

In traditional sense, Cherenkov radiation appears when a charge particle moves in a radiator with a velocity higher than the phase velocity of an electromagnetic wave in this radiator [21]. It was shown in paper [2] that Cherenkov radiation can be generated when charge particle moves in the vicinity of dielectric target. The analytical equation of spectral-angular distribution was derived in geometry of rectangular isosceles dielectric prism.

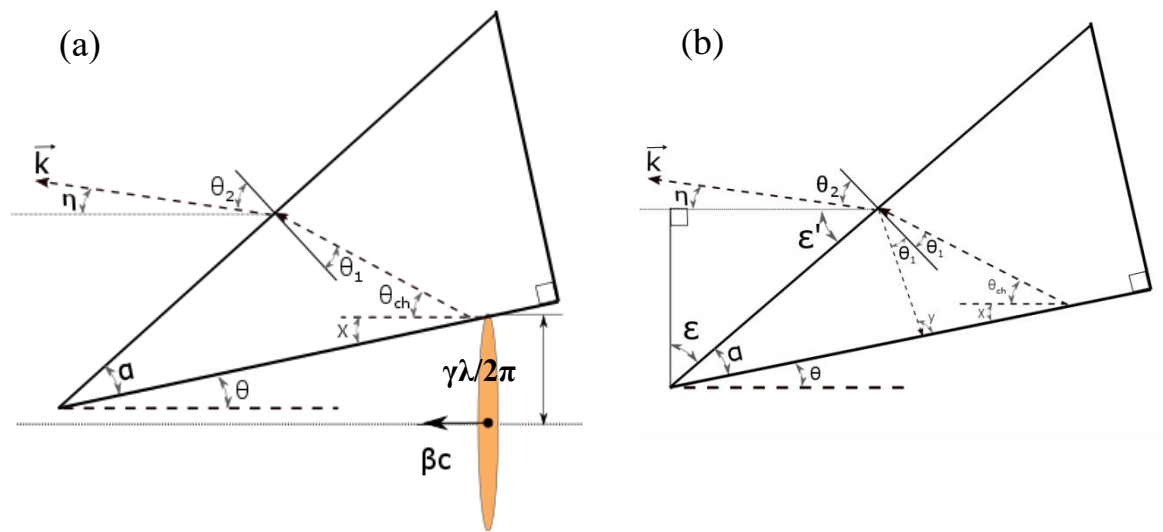


Figure 3 – To the peculiarity of Cherenkov radiation angular distribution derivation: (a) – generation geometry of Cherenkov radiation, (b) – to the peculiarities of angular dependence

Cherenkov radiation is generated in the radiator, but detected in air. It is necessary to account the refraction at the exit face of the dielectric prism.

$$\theta_{ch} = \arccos\left(\frac{\cos(\theta)}{\beta \cdot n}\right) - \theta, \quad (1.15)$$

where θ_{ch} is the Cherenkov angle.

Snellius law gives the connection of the incidence angle inside the radiator and angle in the air:

$$n \cdot \sin(\theta_1) = \sin(\theta_2), \quad (1.16)$$

where n is the radiator refraction index, θ_1 is the incidence angle inside the prism, θ_2 is the refraction angle in the air.

Following trigonometric transformations give the final form of the angular dependence:

$$\pi/2 - \chi + \pi/2 + \theta = \pi \quad (1.17)$$

$$\chi = \theta \quad (1.18)$$

$$2 \cdot \theta_1 + \theta_{ch} + \theta + y = \pi \quad (1.19)$$

$$(\pi/2 - y) + (\pi/2 - \theta_1) + \alpha = \pi \quad (1.20)$$

$$y = \pi/2 - \theta_1 + \alpha \quad (1.21)$$

$$\theta_1 = \pi/2 - \theta_{ch} - \theta - \alpha \quad (1.22)$$

$$\theta_1 = \pi/2 - \arccos\left(\frac{\cos(\theta)}{n \cdot \beta}\right) - \alpha \quad (1.23)$$

$$\theta_2 = \arcsin\left(n \cdot \sin\left(\arcsin\left(\frac{\cos(\theta)}{n \cdot \beta}\right) - \alpha\right)\right) - (\alpha + \theta) \quad (1.24)$$

$$\varepsilon = \pi/2 - (\alpha + \theta) \quad (1.25)$$

$$\varepsilon' = \alpha + \theta \quad (1.26)$$

$$\varepsilon' + \eta + \theta_2 = \pi/2 \quad (1.27)$$

$$\beta = \sqrt{1 - 1/\gamma^2} \quad (1.28)$$

where γ is the Lorentz-factor.

Final angular dependence of Cherenkov radiation in the air is

$$\eta = \arccos\left(n \cdot \sin\left(\arcsin\left(\frac{\cos(\theta)}{n \cdot \beta}\right) - \alpha\right)\right) - (\alpha + \theta) \quad (1.29)$$

Parameters of rectangular isosceles prism used in experiments on the microtron are followings: material is the teflon, refraction index n is equal to 1.433 [13], apex angle of prism α is equal to 45 degree, length of leg L is equal to 175 mm, height H is equal to 75 mm, impact parameter h is equal to 15 mm.

2.2.2 Cherenkov radiation spectral distribution

Cherenkov radiation spectral distribution of one electron for rectangular isosceles prism parameters (see subsection 1.2.1) is calculated via analytical equation (16) in paper [2]. When radiation wavelength is equal or greater than longitudinal size of electron bunch, radiation is named as coherent. Coherent Cherenkov radiation modulated by electron bunch train is detected in experiment. Neglecting the incoherent part of spectrum, Cherenkov radiation spectral distribution from bunch train is

$$\frac{dW_{coh}}{d\omega} \approx N_e^2 \cdot F_b(\omega) \cdot G_{train}(\omega) \cdot \frac{dW_e}{d\omega}, \quad (1.30)$$

where N_e is the bunch population, $F_b(\omega)$ is the bunch longitudinal form-factor, $G_{train}(\omega)$ is the train form-factor, $dW_e/d\omega$ is the single electron Cherenkov radiation spectral distribution.

$$F_b(\omega) = \exp\left(-\omega^2 \cdot \frac{\sigma_z^2}{c^2}\right), \quad (1.31)$$

where σ_z is the longitudinal size of bunch, ω is the radiation frequency, c is the light velocity.

$$G_{train}(\omega) = \left(\frac{1}{N_b} \cdot \frac{\sin(N_b \omega \Lambda / 2c)}{\sin(\omega \Lambda / 2c)}\right)^2, \quad (1.32)$$

where Λ is the spacing between bunches in train, N_b is the number of bunches in train.

$$F(\omega) = F_b(\omega) \cdot G_{train}(\omega) \quad (1.33)$$

The longitudinal form-factor of bunch train is represented on figure 4 for the followings parameters: rms length of bunch σ_z is equal to 5 mm; number of bunches in train N_b (shown as N on figure 4) is equal to 1 and 10 ; bunch spacing Λ is equal to 114 mm.

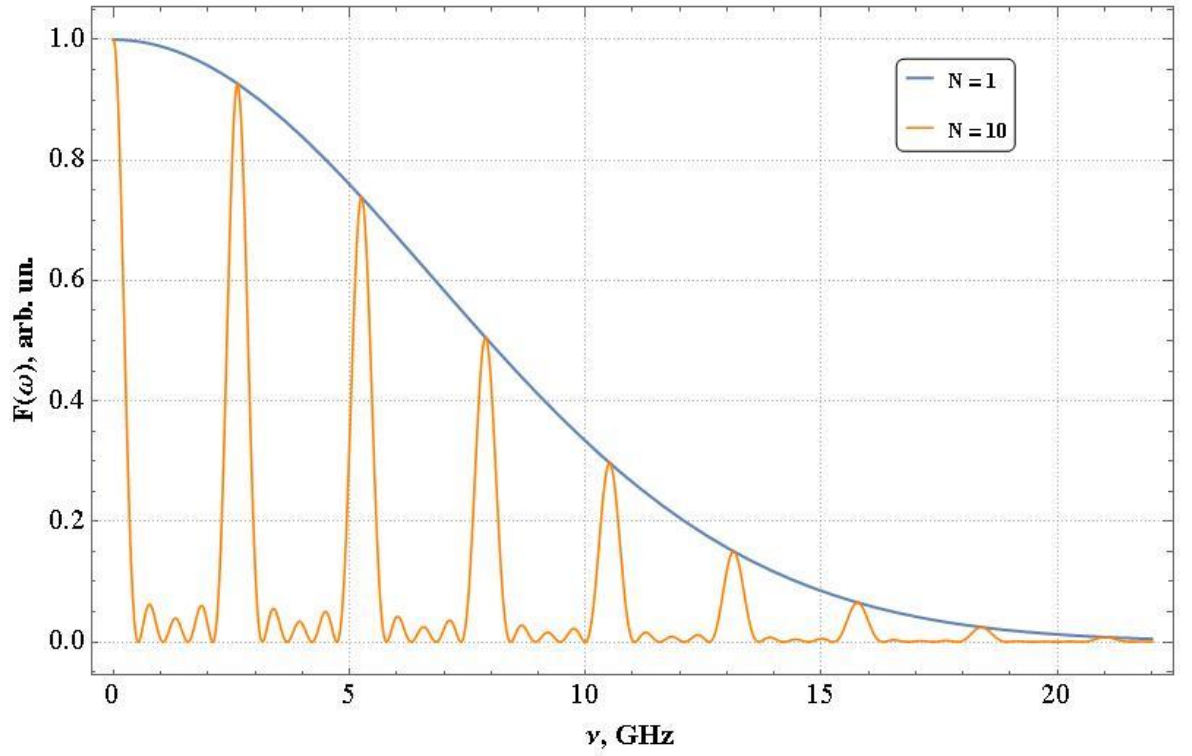


Figure 4 – Bunch train longitudinal form-factor: $\sigma_z = 5$ mm;
 $N_b = N = 1, 10$ bunches; $\Lambda = 114$ mm.

2.3 Multilayer target as a source of quasi-Cherenkov radiation

If gap width between layers is less than radiation impulse duration, assuming radiation impulse is approximated by Gauss distribution, diffraction radiation can be considered as a quasi-Cherenkov radiation generated at anisotropic radiator with tensor dielectric permittivity. The tensor dielectric permittivity gives the tensor refraction index by:

$$n_{eff}(\theta) = \sqrt{\varepsilon_{eff}(\theta)}, \quad (1.34)$$

where ε_{eff} is the effective dielectric permittivity.

The effective refraction index connects quasi-Cherenkov output angle with multilayer prism inclination angle. Transformation of (1.29) gives the transcendent equation:

$$\arcsin\left(\frac{\cos(\eta_{qch} + \alpha + \theta)}{n_{eff}}\right) = \arcsin\left(\frac{\cos(\theta)}{n_{eff} \cdot \beta}\right) - \alpha \quad (1.35)$$

The effective refraction indexes are calculated with measured quasi-Cherenkov radiation angle η_{qch} and the orientation angle θ .

2.4 Calculation of necessary conditions to carry out experiment on the microtron

2.4.1 Tomsk polytechnic university microtron

Microtron is a circular resonance accelerator, which bending magnetic field and accelerating frequency are constant. Circulation period of time in bending magnetic field changes every round. Time to pass electron bunch into resonator and accelerating field phase are synchronized.

RF field from microtron RF system (1) propagates through waveguide line (2) to resonator (3). Resonator is placed at dipole magnet (4). There is the microtron thermocathode on the surface of resonator (3). Thermoelectrons are matched in resonator (3) acceleration phase and start to move around circular orbits (5). Circular orbits (5) have only one matching point at resonator (3). Kinetic energy of electron bunch is increased by a constant amount at 0.511 MeV over each passing through resonator (3). Electron bunch is extracted to beam line on the last orbit via magnetic screen (6) matched with dipole magnet (4). Beam line magnetic system has quadrupole lenses (7) and bending magnet (8). Propagated via magnetic system electron bunch is extracted to experimental area (11) via 50 μm beryllium window (9) placed at outlet pipe (10).

The TPU microtron layout is presented in figure 5.

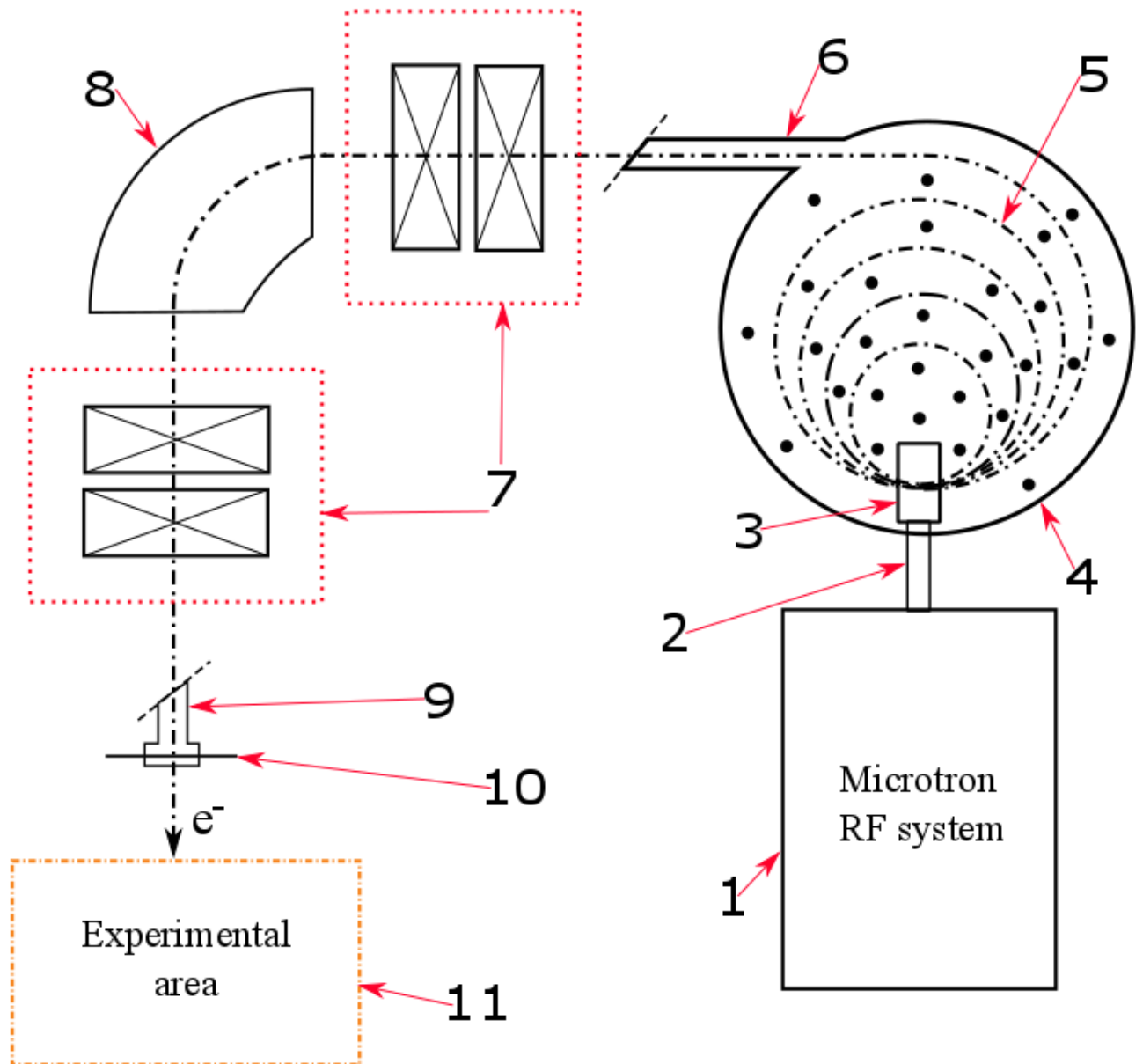


Figure 5 – TPU microtron layout: 1 is the microtron RF system; 2 is the waveguide line; 3 is the resonator; 4 is the dipole magnet; 5 is the electron bunch orbit; 6 is magnetic screen; 7 is the two quadrupole magnet doublets; 8 is the bending magnet; 9 is the outlet pipe; 10 is the 50 μm beryllium window; 11 is the experimental area.

2.4.2 Contribution of TE modes generation in planar waveguide to radiation spectrum

Experiment was planned to carry out on extracted relativistic electron beam of the microtron. The microtron is a circular resonant accelerator of relativistic electron beams [24]. The microtron parameters are presented in the table 1.

Table 1– Parameters of the extracted relativistic electron beam of the microtron

Electron energy, E	6.1 MeV
Lorentz-factor, γ	12
Macropulse duration, τ	4 μ s
Macropulse frequency, ν_{macro}	1~ 10 Hz
Length of electron bunch, σ_z	8.16 mm
Number of electrons in bunch, N_e	10^8
Number of bunches in macropulse, N_b	10^4
Distance between bunches Λ	114 mm
Frequency of the RF field, ν_{RF}	2.63 GHz
Cross section of the bunch, $\sigma_x \times \sigma_y$	4 \times 2 mm
Angular divergence of the bunch, φ	0.08 rad

The one period of the multilayer prism is a planar waveguide with feature of cutoff waveguide. According to cutoff waveguide condition [25], wavelength more than λ_{crit} is exponentially attenuated in the planar waveguide. Mentioned above condition allows to filtrate the wavelength of output radiation.

Cutoff waveguide condition is

$$\lambda_{crit,n} = \frac{2 \cdot a}{m}, \quad (1.36)$$

where a is the gap width between two close layers, m is the number of TE mode [25].

Cutoff waveguide condition in frequency domain is

$$\nu_{crit,n} = \frac{m \cdot c}{2a\sqrt{\epsilon\mu}}, \quad (1.37)$$

where c is the light velocity, ϵ and μ are the dielectric and the magnetic permittivities of radiator between two layers.

2.4.3 Radiation spectrum modulation by bunch train

It is necessary to account the additional resonance generated by bunch train, e.g. beam. There are experimental and theoretical investigations of coherent transition radiation generated by bunch train shown in paper [24]. Bunch train resonances lead the monochromatic separate peaks in spectral distribution that are multiplies of the fundamental RF field frequency and resonance order:

$$\nu_n = n \cdot \nu_{RF}, \quad (1.38)$$

where n is the resonance order.

Table 2 – Bunch train resonances

n	4	5	6	7	8	9	10
ν_n , GHz	10.5	13.3	15.8	18.4	21.0	23.6	26.3
λ_n , mm	28.5	22.5	19.0	16.2	14.3	12.7	11.4

Wavelength of the fourth bunch train resonance is roughly equal to the second TE mode of planar waveguide $\lambda_{crit,n}$ at 26.5 mm. There will be only peaks and modes of some intermediate level between 26.5 mm and 28.5 mm in radiation spectrum. Suggested reason is the imperfection of planar waveguide.

2.4.4 Infrared spectroscopy with usage of Martin-Puplett interferometer

Autocorrelation curves (named as “interferogramm” hereafter) of diffraction radiation and Cherenkov radiation were measured with Martin-Puplett interferometer (better known as polarized Michelson interferometer). Martin-Puplett interferometer layout is shown on figure 6. The maximum path of movable mirror is 310 mm. The mentioned above maximum path limits the precision of radiation spectrum measurements [27]. The evolution of radiation polarization is highlighted with red color on figure 6.

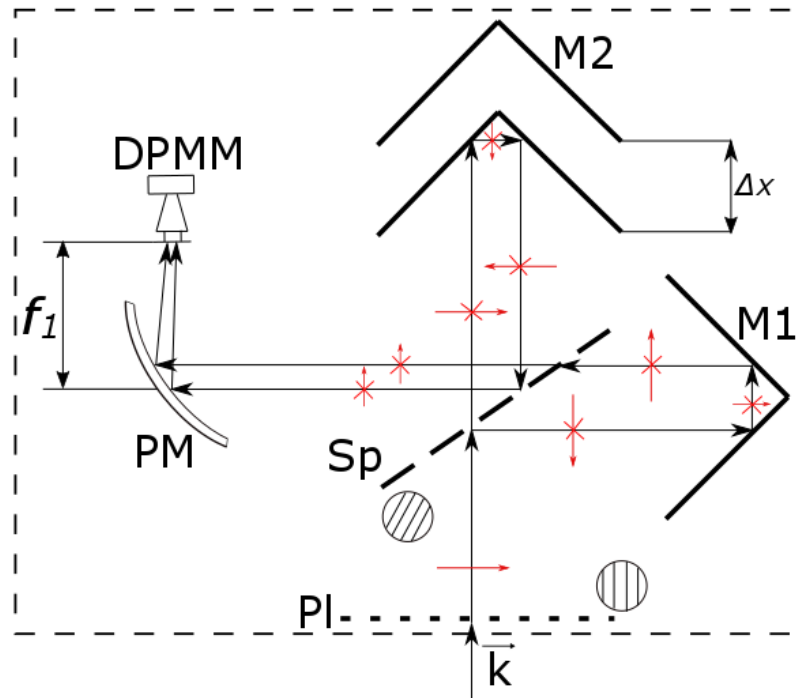


Figure 6 – Martin-Puplett interferometer layout: P1 is wire-grid polarizer, Sp is polarized beam splitter, M1 is fixed roof mirror, M2 is movable roof mirror, PM is parabolic mirror with a focal length of 95 mm, DPMM is detector, based on a broadband antenna with zero-threshold diode

Interferogramm without appodization is the infinite interferogramm curve multiplied by a window step-function. Precision of reconstructed spectrum from nonappodized autocorrelation curve is

$$\delta\nu = \frac{1.21 \cdot c}{2L}, \quad (1.39)$$

where ν is the radiation frequency, $\delta\nu$ is the full width at half maximum (named as FWHM hereafter), c is the light velocity, L is the maximum path of movable roof mirror.

Initial interferogramm multiplied by triangle curve (triangle appodization) is named as appodized interferogramm. When triangle appodization is provided for an initial interferogramm, precision of reconstructed spectrum is

$$\delta\nu = \frac{1.79 \cdot c}{2L} \quad (1.40)$$

Moreover, it is necessary to take into account the radiation background and white noise of DPMM detector (named as background noise hereafter) as well as finite size of radiation source. The ratio of signal to background noise defines the length of movable mirror maximum path. For parameters of Martin-Puplett interferometer in “Photon” laboratory, the ratio of signal to background noise allows to use whole length at 310 mm. There are parameters of Martin-Puplett interferometer in table 3.

Table 3 – Martin-Puplett interferometer parameters

Sizes	550 × 550 mm
Sizes of roof mirrors M1 and M2	170 × 170 mm
Diameter of the mirror PM	210 mm
Focal length f_1	95 mm
Sizes of the polarizer Pl	210 × 210 mm
Displacement of the roof mirror M2 (Δx)	310 mm
Accuracy of displacement of M2	0.05 mm
Zero position point length	34 mm

The absolute precision of reconstructed spectrum of triangle appodized interferogram at $\nu = 10.5, 13.3$ and 21.0 GHz is equal to $\Delta\nu_{int} = 0.49$ GHz. Relative precisions are equal to $\Delta\nu_{int}/\nu = 4.62, 3.65$ and 2.31% .

Also precision of reconstructed spectrum depends on the fundamental FWHM of spectral line and finite detector aperture. The fundamental FWHM of diffraction radiation spectral line is

$$\Delta\nu_{DR} = \frac{0.89}{k \cdot N_{eff}} \cdot \nu_k, \quad (1.41)$$

where k is the diffraction order, N_{eff} is the number of effective grating periods. The factor 0.89 comes from the Fourier transform of the periodical function (target period), shaped by the rectangular window representing the finite target length.

$$N_{eff} = \frac{L_{eff}}{d}, \quad (1.42)$$

where L_{eff} is the effective length of periodic target.

$$L_{eff} = \frac{\gamma\lambda}{\sin(\theta)}, \quad (1.43)$$

where λ is the radiation wavelength.

$$\Delta\nu_{DR} = \frac{0.89 \cdot d}{k \cdot \gamma\lambda \cdot c} \cdot \nu_k^2 \cdot \sin(\theta) \quad (1.44)$$

If number of bunches in train is greater than periods of target, the equation (1.35) will be transformed to

$$\Delta v_{DR} = \frac{0.89}{k' \cdot N_b} \cdot v_{k'}, \quad (1.45)$$

where k' is the resonance order of bunch train, N_b is the number of bunches in train.

$$\Delta \lambda_{apr} = \frac{d \cdot \sin(\alpha + \theta + \eta)}{k \cdot \cos(\alpha)} \cdot \Delta \eta \quad (1.46)$$

where k is the diffraction order of multilayer target, $\Delta \eta$ is the detector aperture.

$$\Delta v_{apr} = \frac{d \cdot \sin(\alpha + \theta + \eta)}{k \cdot \cos(\alpha) \cdot c} \cdot v_k^2 \cdot \Delta \eta, \quad (1.47)$$

where v_k is the frequency of the k -diffraction order of multilayer target.

General equation of the spectral line FWHM is

$$\Delta v_k = \sqrt{(\Delta v_{DR})^2 + (\Delta v_{apr})^2 + (\Delta v_{int})^2} \quad (1.48)$$

Equation (1.40) is valid for the bunch train parameters on the microtron, because the diffraction radiation FWHM is equal to $0.19 \cdot 10^{-3}$ GHz. Such value of FWHM allows considering diffraction radiation spectral line as a narrow monochromatic line with single frequency. From the above-given notes, equation (1.47) can be transformed to

$$\Delta v_k = \sqrt{(\Delta v_{apr})^2 + (\Delta v_{int})^2} \quad (1.49)$$

2.5 Data treatment algorithm

There are two types of dependences measured in the experiment: the first one is the orientation dependence (known as “ θ -scan” in literature), the second one is the radiation interferogramm. It is necessary to provide correct post-processing procedures to get valid experiment data. The post-processing algorithm for orientation dependences is following

1. data import from the source file;
2. averaging of detector signals and fast-current transformer signals in ten shots for each angle position of target;
3. calculation of data dispersion and mean;
4. subtraction of background signal from averaging data;
5. normalization of post-processed detector signal on fast-current transformer signal.

Mentioned above steps are implemented into the interferogramm post-processing algorithm, as well as necessary additional steps in following order:

1. approximation of normalized signal by linear regression;
2. subtraction of approximated curve from normalized data;
3. simmetrization of interferogramm relatively to zero position point;
4. data appodization with triangle curve;
5. discrete Fourier transform (DFT) [28] of symmetrized interferogramm;
6. calculation of DFT error;
7. spectral lines approximation with Gaussian distribution.

Two mentioned above algorithms were coded with object-oriented programming language Python 3.x. Python 3.x has a good expressiveness, wide additional libraries to provide numerical calculations (numpy, scipy, matplotlib et cetera).

The graphical user interface (GUI) will be coded with usage of the PyQt5 library in future.